

Zur Geochemie des Amphibolitkomplexes im  
präkambrischen Basement von SW-Nigeria,  
östlich von Ile-Ife.

Inaugural – Dissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades  
der Fakultät für Geowissenschaften  
der Ludwig – Maximilians – Universität zu München

vorgelegt von  
Bernhard M. Wagner  
München, 1980



Zur Geochemie des Amphibolitkomplexes im  
präkambrischen Basement von SW-Nigeria,  
östlich von Ile-Ife.

Inaugural-Dissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades  
der Fakultät für Geowissenschaften  
der Ludwig-Maximilians-Universität zu München

vorgelegt von  
Bernhard M. Wagner  
München, 1980



1. Berichterstatter: Prof. Dr. D. D. Klemm
  2. Berichterstatter: Prof. Dr. K. Schmidt
- Tag der mündlichen Prüfung: 26. 11. 1980

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit wurde im Januar 1977 auf Anregung meines sehr verehrten Lehrers, Herrn Prof. Dr. D. D. Klemm begonnen. Ihm gilt mein herzlicher Dank für seine freundliche Unterstützung und kritische Anteilnahme, die den Fortgang dieser Arbeit entscheidend förderte.

Herrn Prof. Dr. K. Schmidt danke ich für die Bereitstellung eines Arbeitsplatzes, sowie für wertvolle Literaturhinweise.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. K. Weber-Diefenbach, der mit großem Engagement Hilfestellung bei der geochemischen Analytik leistete und durch stetige wertvolle Kritik viel zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat.

Für die große organisatorische Hilfe in Nigeria und für sein ständiges freundliches Entgegenkommen möchte ich mich bei Dr. G. Matheis und seiner Frau besonders bedanken.

Bei Herrn Priv. Doz. Dr. Masch vom Institut für Mineralogie und Petrographie möchte ich mich für die Durchsicht von Dünnschliffen bedanken. Herrn Nadler, der dem selben Institut angehört, danke ich für die Durchführung der  $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ -Bestimmungen.

Bei meinem Kollegen Dipl. Geol. W. Schneider bedanke ich mich für die gemeinsame Zeit in Nigeria und für die vielen Diskussionen im Verlauf dieser Arbeit.

Ebenso möchte ich den Mitgliedern des Departments of Geology der Universität Ife für ihr freundliches Entgegenkommen danken.

Allen Angehörigen des Institutes für Allg. und Angew. Geologie und insbesondere der Abteilung Geochemie und Lagerstättenforschung danke ich sehr herzlich für die vielen fruchtbaren Diskussionen und für die stetige Hilfsbereitschaft.

Meiner Frau Elisabeth bin ich für zeitraubende Schreib- und Zeichenarbeit zu besonderem Dank verpflichtet.

Dem DAAD danke ich für die Finanzierung des Geländeaufenthalts im Rahmen eines Forschungsstipendiums.



## Kurzfassung

Das präkambrische Basement von SW-Nigeria kann grob in einen Migmatit-Gneis-Granit-Komplex und verschiedene metavulkano-sedimentäre Abfolgen unterteilt werden, wobei letztere im Ife - Ilesha - Gebiet (Amphibolitkomplex) ein radiometrisch bestimmtes Alter von  $1150 \pm 200$  m. a (Kibaran) aufweisen. Dies aber würde ein kontinentales Entstehungsmilieu bedeuten. Der Vergleich der Metabasalte des Amphibolitkomplexes mit jungen Basalten verschiedener geotektonischer Stellungen spricht deutlich für ein ozeanisches Bildungsmilieu mit größter Affinität zu Ozeaninselbasalten.

Trotz spezieller geochemischer Eigenheiten weist der Amphibolitkomplex eine große Ähnlichkeit mit archaischen Grüngesteinsabfolgen auf. Ein Teil der Metatholeiite besitzt einen mondbasaltähnlichen Chemismus, was die Annahme unterstützt, daß die Metavulkanite einem früharchaischen, 'primitiven' Erdmantel entstammen.

Die petrogenetischen Überlegungen ergeben ein Entstehungsmodell für die Magmatite, das auf einem an Cpx und Opx angereicherten oberen Erdmantel beruht. Insgesamt können drei Magmatypen unterschieden werden:

1. Ca-reiche Apatit-Pyroxenite und ein Metagranodiorit, die durch fraktionierende Kristallisation aus einem melilithbasaltähnlichem Magma gebildet worden sind.
2. Zr- und Cr-reiche Basalte, deren Chemismus auf eine Mischung von Magmen unterschiedlichen Aufschmelzgrades mit anschließender fraktionierender Kristallisation hindeutet.
3. Eine mafisch-ultramafische Abfolge (Komatiite) deren Genese durch progressives partiales Aufschmelzen und Mischung der einzelnen Schmelzbeträge erklärt werden kann.

Das heutige Meerwasser wurde durch Entgasungsvorgänge der Erde im Archaikum gebildet. Die Entgasung der Erde bzw. die Aufschmelzung



des oberen Erdmantels unter hohen  $H_2O$ -Drucken hatte folgende Auswirkungen:

- Der archaische obere Erdmantel wurde an Opx angereichert, was die Existenz  $SiO_2$ -reicher Ultramafitite sowie kalkalkalischer Gesteine erklärt.
- Die Schmelztemperatur des oberen Erdmantels wird drastisch erniedrigt, so daß ultrabasische Laven auch in geringer Tiefe gebildet werden können.
- Die durchströmende Gasphase konzentriert Metalle, Schwefel und Halogene im oberen Erdmantel und forciert somit die Bildung der archaischen Erzlagerstätten.

Die archaischen Grünsteinsgebiete sind bekannt als potentielle Rohstoffträger, so daß aufgrund der Untersuchungsergebnisse eine detaillierte Prospektion auf die für das Archaikum typischen Erzlagerstätten naheliegend ist.

### Abstract

The precambrian basement of SW-Nigeria is subdivided into a migmatite-gneiss-granite complex and several metavolcano-sedimentary sequences. Based on radiometric age determination the latter rock types in the Ife-Ilesha area (Amphibolite Complex) were regarded to be of Kibaran age ( $1150 \pm 200$  m. a.), which indicates a continental evolution environment. Compared with basaltic rocks of different tectonic settings, the investigated metabasalts show a strong affinity to basaltic rocks of oceanic islands.

The Amphibolite Complex has many features in common with archaean greenstone belts, although there are some geochemical particularities. Many of the metatholeiites show element distributions similar to lunar mare basalts. This supports the assumption that the metavulcanites are



produced by an early archaean, still primitive earth mantle.

Petrogenic considerations yield a model which is based on an Cpx- and Opx-enriched earth mantle. Altogether three different magma types can be distinguished:

1. Ca-rich apatite-pyroxenites and a granodiorite which were formed by fractional crystallisation out of a magma resembling a melilite-basalt.
2. Zr- and Cr-rich basalts with a chemism indicating mixing of magmas with varying degrees of partial melting followed by fractional crystallisation.
3. A mafic-ultramafic sequence (komatiites), the genesis of which can be explained by progressive partial melting and mixing of the individual melting increments.

The present hydrosphere was formed by degassing of the earth in the Archaean. Degassing of the earth and/or partial melting of the upper mantle under high  $H_2O$ -pressure, had the following consequences:

- The archaean upper mantle was enriched in Opx, which explains the existence of  $SiO_2$ -rich ultramafites as well as calcalkaline rocks.
- The melting temperature of the upper mantle is drastically decreased, so that ultrabasic lavas can also be formed near the surface.
- The percolating gaseous phase concentrates metals, sulfur and halogenes in the upper mantle and thus favours the formation of the archaean ore deposits.

The archaean granite-greenstone areas are well known for their numerous ore deposits of great economic importance. Consequently the results call for a detailed prospection for ore minerals, which are observed in other archaean areas.



## Inhaltsverzeichnis

|                                                                                 | Seite |
|---------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 1. Einleitung                                                                   | 1     |
| 2. Regionale Geologie                                                           | 1     |
| 3. Geologie des Amphibolitkomplexes                                             | 5     |
| 3.1. Einleitung                                                                 | 5     |
| 3.2. Der geologische Aufbau des Amphibolitkomplexes                             | 6     |
| 3.3. Die Ifewarastörung                                                         | 11    |
| 3.4. Der Amphibolitkomplex im Vergleich mit den archaischen<br>Greenstonebelts  | 12    |
| 4. Geochemie                                                                    | 14    |
| 4.1. Einleitung                                                                 | 14    |
| 4.2. Arbeitsmethoden                                                            | 15    |
| 4.3. Geochemische Unterteilung des Amphibolitkomplexes                          | 17    |
| 4.4. Der Einfluß von Verwitterung und Metamorphose                              | 18    |
| 4.4.1. Metamorphose                                                             | 19    |
| 4.4.2. Oberflächenverwitterung                                                  | 20    |
| 4.4.3. Submarine Verwitterung                                                   | 22    |
| 4.4.4. Zusammenfassung                                                          | 23    |
| 4.5. Komatiite                                                                  | 25    |
| 4.6. Geochemische Charakterisierung                                             | 26    |
| 4.6.1. Ortho- oder Paragesteine                                                 | 26    |
| 4.6.2. Klassifizierung der Metabasalte                                          | 28    |
| 4.6.3. Geochemische Merkmale des Amphibolitkomplexes                            | 32    |
| 4.7. Die geotektonische Stellung der Amphibolite                                | 37    |
| 4.7.1. Einleitung                                                               | 37    |
| 4.7.2. Vergleich mit modernen Basalten                                          | 38    |
| 4.8. Der Amphibolitkomplex im Vergleich mit archaischen<br>Grüngesteinsabfolgen | 45    |



|                                                                                               | Seite  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| 4.8.1. Einleitung                                                                             | 45     |
| 4.8.2. Vergleich mit archaischen und jungen Tholeiiten                                        | 46     |
| 4.8.3. Diagramm $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3$                                          | 46     |
| 4.8.4. Diagramm $\text{CaO} - \text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3$                             | 48     |
| 4.8.5. Diagramm $\text{K} - \text{Rb}$                                                        | 49     |
| 4.8.6. Diagramm $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{FeO}/(\text{FeO} + \text{MgO})$                | 50     |
| 4.8.7. Vergleich mit Mondgesteinen                                                            | 52     |
| 4.8.8. Die geochemische Differentiation des oberen Erdmantels<br>im Verlauf der Erdgeschichte | 54     |
| 4.9. Die Genese des Amphibolitkomplexes                                                       | 57     |
| 4.9.1. Einleitung                                                                             | 57     |
| 4.9.2. $\text{TiO}_2 - \text{P}_2\text{O}_5$                                                  | 57     |
| 4.9.3. $\text{Ti} - \text{Zr} - \text{Y}$                                                     | 60     |
| 4.9.4. $\text{Y} - \text{Zr}$                                                                 | 70     |
| 4.9.5. Modell zur Genese des Amphibolitkomplexes                                              | 74     |
| 5. Überlegungen zur Genese der archaischen Erdkruste und<br>ihrer Erzlagerstätten             | 79     |
| 5.1. Die archaische Erdkruste                                                                 | 79     |
| 5.2. Die Mineralisationen der archaischen Grüngesteinsareale                                  | 81     |
| 5.3. Überlegungen zur Genese der archaischen Erzlagerstätten                                  | 82     |
| 6. Die Mineralisationen des präkambrischen Basements von<br>Nigeria                           | 84     |
| 7. Abschließende Bemerkungen                                                                  | 87     |
| <br>Literaturverzeichnis                                                                      | <br>91 |

## Anhang

Tabelle 2

Tabelle 4

Erläuterungen zu den Analysetabellen



Analysentabellen

$\text{Fe}^{2+}$  /  $\text{Fe}^{3+}$  - Bestimmungen

Au - Bestimmungen

Lebenslauf

Geologische Profile



## 1. Einleitung

Der Amphibolitkomplex ist Teil einer metavulkano-sedimentären Abfolge im präkambrischen Basement von SW-Nigeria, in deren Bereich z. T. wirtschaftliche Mineralisationen von Gold, Zinnstein, Columbit und Tantalit auftreten. Die Altersstellung dieser Serie ist jedoch bisher noch nicht geklärt, da die wenigen radiometrischen Altersdatierungen nur den Zeitpunkt verschiedener Metamorphoseereignisse im nigerianischen Basement wiedergeben.

Ein wesentliches Ziel dieser Arbeit war zu prüfen, ob die regional-metamorph überprägten Magmatite im Gebiet östlich von Ife/Nigeria auf geochemischem Weg den archaischen 'Greenstonebelts' zugeordnet werden können. Die Auswahl des Amphibolitkomplexes als Untersuchungsobjekt beruht auf vorhergehenden Arbeiten von MATHEIS (1976, 1977), die unter anderem eine Überprüfung der geologischen Karte von DE SWARDT et al. (1965) notwendig machen.

Die Geländearbeit für diese Untersuchung wurde im Jahr 1977 im Rahmen eines Austauschprogrammes zwischen den geologischen Instituten der Universitäten von Ife/Nigeria und München durchgeführt. Parallel zu dieser Untersuchung ist eine Arbeit über die Metasedimente einschließlich der Strukturgeologie des gesamten Gebietes (SCHNEIDER), sowie eine spezielle petrographische Bearbeitung des Amphibolitkomplexes (ELUEZE) in Vorbereitung.

## 2. Regionale Geologie

Das Arbeitsgebiet um Ife-Ilesha liegt zentral im Basementkomplex von SW-Nigeria. Die entsprechende geologische Karte 1 : 250 000 Blatt 60 (Iwo) wurde in den fünfziger und sechziger Jahren von



DE SWARDT, OGBUKAGO und vor allem F. H. HUBBARD im Rahmen einer Überblickskartierung des geologischen Surveys von Nigeria hergestellt.



Abb. 1: Geologische Karte der Iwo-Region von HUBBARD (1975)  
1 = Migmatit-Gneis-Komplex; 2 = Charnockit; 3 = frühe granitische Phasen des 'Older Granite' Zyklus; 4 = jüngere granitische Phasen des 'Older Granite' Zyklus; 5 = Amphibolit, Amphibolschiefer und Metapelite; 6 = Quarzit, quarzreiche Schiefer und Quarz-Feldspat-Gneise; 7 = Gebiete mit Überwiegend Granitgneis; p = Pegmatit, T = Tonalit;



F. H. HUBBARD (1975) unterteilt das südwestnigerianische Basement grob in einen Migmatit-Gneis-Granit-Komplex und in metasuprakrustale Abfolgen (Abb. 1). Obwohl der Migmatit-Gneis-Granit-Komplex einen Metamorphosegrad der Amphibolitfazies zeigt, können auch Pyroxen-Granulite und Charnockitreste gefunden werden, die zwar großteils diaphtorisiert und migmatisiert sind, aber eine frühe hochgradige Metamorphose anzeigen. Quarzithorizonte markieren alte suprakrustale Reste und eine Vielzahl von Granitplutonen bilden gut erkennbare, begrenzte Komplexe aus.

Die metasuprakrustalen Abfolgen sind am besten in einem NNE-streichenden Belt in der Ife-Ilesha Gegend aufgeschlossen; ähnliche Serien treten aber auch in der Umgebung von Ibadan auf. Im Bereich von Ife-Ilesha hält HUBBARD (1975) eine Zweiteilung dieser Serien durch ein Störungssystem für wahrscheinlich. Die westliche Flanke besteht überwiegend aus Amphiboliten und Peliten in Gesellschaft von Granitgneisen und Pegmatiten, während der östliche Teil eine sedimentäre Abfolge von Quarziten, quarzitischen Schiefern und Gneisen darstellt. Die Überlagerung der Metavulkanite durch die Quarzite, die im Bereich des Störungssystems oft unklar ist, kann nordöstlich von Ilesha deutlich erkannt werden.

Radiometrische Daten von GRANT (1972) ergeben drei proterozoische Metamorphoseereignisse mit deren Hilfe HUBBARD (1975) folgende Entwicklungssequenz für das nigerianische Basement interpretiert: Archaische Krustengesteine werden in eine proterozoische 'Mobile Belt' Entwicklung während des Eburnian ( $1950 \pm 250$  Mio.a) mit einbezogen.

Aufgrund der Altersdatierung von  $1150 \pm 200$  Mio.a für den Ife Granitgneis schlägt HUBBARD (1975) eine kibarische Greenstonebelt-Granit-



entwicklung für die Bildung der Ife-Ilesha metavulkanisch-sedimentären Abfolge vor.

Eine späte, weitverbreitete Wiederaufarbeitung der Kruste mit granitischem Plutonismus wird in den pan-afrikanischen (Older Granite) Zyklus ( $600 \pm 150$  Mio.a) gestellt.

Das Alter von  $2205 \pm 70$  Mio.a (GRANT, 1970) des Granitgneisses von Ibadan gab RAHAMAN (1976) den Anlaß einen 'Ancient Granite'-Zyklus von den panafrikanischen Graniten zu unterscheiden. Dies könnte nach RAHAMAN (1976) eine Erklärung dafür sein, daß die Migmatitgebiete des nigerianischen Basements weitgehend keinen Zusammenhang mit den panafrikanischen 'Older Granites' aufweisen, deren Migmatisierungseffekte unmittelbar auf den Bereich der intrusiven Granitkörper beschränkt sind. Weiterhin vertritt RAHAMAN (1976) die Meinung, das kibarische Alter ( $1150 \pm 200$  Mio.a) des Ife-Granitgneisses nochmals zu überprüfen. Er hält es für möglich, daß durch den Einfluß der panafrikanischen Orogenese eine partielle Homogenisierung der Sr-Isotopen erfolgt ist, zumal bisher im SW-nigerianischen Basement im Zeitraum zwischen 2000 bis 600 Mio. Jahren keine orogenen Ereignisse nachgewiesen werden konnten.

In jüngerer Zeit häufen sich die Hinweise, daß das nigerianische Basement archaisches Gesteinsmaterial beinhaltet. Radiometrische Altersbestimmungen an verschiedenen Gneisen und Apliten (in ODEYEMI 1979) weisen auf eine liberianische Orogenese vor 2800 - 2500 Mio.a hin und es scheint durchaus möglich, daß die Entstehungszeit der oft mit Amphiboliten und Quarziten vergesellschafteten Gneise auf 3000 Mio.a oder früher anzusetzen ist.







für die geologische und geochemische Bearbeitung acht Profile meist senkrecht zur generellen Streichrichtung (N - NE) ausgewählt, um auf diese Weise die bisher ausgehaltenen Groseinheiten zu differenzieren und die geologischen Zusammenhänge zu klären.

Die dichte Vegetation des sekundären Regenwaldes sowie die tiefe lateritische Verwitterung waren ein großes Hindernis bei der Beschaffung frischen Gesteinsmaterials. Notwendigerweise wurden auch Lese-  
steine bei der Probennahme berücksichtigt.

### 3.2. Der geologische Aufbau des Amphibolitkomplexes

Die Auswertung der geologischen Profile (s. Anhang) ergab, daß die von HUBBARD (1965) getroffene Einteilung des Amphibolitkomplexes in 'Epidiorite', 'Schist and Epidiorite Complex' und 'Schists pegmatized' nicht übernommen werden kann. (Abb. 3). Obwohl die schlechten Aufschlußverhältnisse eine vollständige Klärung der stratigraphischen Verhältnisse erschweren, kann der geologische Aufbau des Amphibolitkomplexes folgendermaßen beschrieben werden:

Als Basis der ganzen Sequenz werden ein apatitreicher Pyroxenit und ein Metagranodiorit betrachtet, deren Liegendes aus topographischen Gründen nicht aufgeschlossen ist. Hauptminerale in den Pyroxeniten sind mittelkörniger, diopsidischer Augit und bis zu 10 % Apatit, daneben Rutil, Titanit, sowie grüne Hornblende, Chlorit und Calcit als Umwandlungsprodukte der Pyroxene.

Der Metagranodiorit zeichnet sich zum Teil durch ein porphyrisches Gefüge aus. Hauptkomponenten sind Mikroperthit und stellenweise bis zu faustgroße Hornblenden in einer Mikroklin-Plagioklas-Quarzmatrix. Charakteristisch sind bläulich schimmernde Quarzkörner, deren Färbung wahrscheinlich auf feine Rutileinschlüsse zurückzuführen ist



(TRÖGER, 1969). Kerne von diopsidischem Pyroxen in den Hornblenden sowie hohe Apatitgehalte lassen eine genetische Verwandtschaft mit den Apatit-Pyroxeniten vermuten.

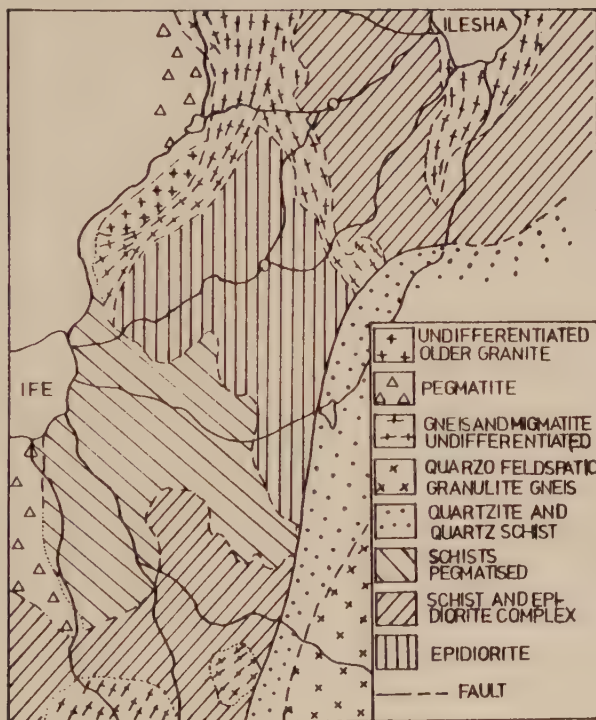


Abb. 3: Ausschnitt der geologischen Karte, 1 : 250 000, Blatt 60 (Iwo) von DE SWARDT et al. (1965), Geological Survey of Nigeria.

Die Apatit-Pyroxenite erreichen ihre größte Mächtigkeit in den Profilen B und C und scheinen sowohl nach Norden (Profil A) als auch nach Süden (Profil E) abzutauchen. Der Metagranodiorit bildet im östlichen Teil des Arbeitsgebietes einen ca. 30 km<sup>2</sup> großen Komplex



aus und ist im Profil E am besten aufgeschlossen. Seine wahre Ausdehnung kann nur schwer abgeschätzt werden; einzelne Vorkommen in den Profilen A, C und D, sowie nördlich von Ogudu (Profil F) deuten darauf hin, daß der Metagranodiorit große Bereiche des Amphibolitkomplexes unterlagert und wahrscheinlich im Untergrund in direktem Kontakt mit dem Apatit-Pyroxenit steht.

Metagranodiorit und Apatit-Pyroxenite werden von einer Amphibolitabfolge überlagert, die durch Einschaltungen von Metapyroxeniten, Talk-Anthophyllitschiefern und quarzreichen Sedimenten charakterisiert ist.

Die Amphibolite können grob in zwei Gruppen unterteilt werden, die untereinander alle Übergänge zeigen. Die erste Gruppe besteht aus dunkelgrünen Chlorit-Hornblenditen mit keinem oder sehr wenig Feldspat. Charakteristisch sind Pyroxenreste sowie feinkörnige Ilmenitpartikel in Chlorit, die auf umgewandelte Titanaugite zurückzuführen sein könnten. Die zweite Gruppe ist durch eine von hohen Ilmenitgehalten hervorgerufene schwarze Färbung gekennzeichnet. Im Gegensatz zu den Chlorit-Hornblenditen sind hohe Gehalte an Ca-reichem Plagioklas (bis zu 35 %) zu beobachten, während Chlorit in den Hintergrund tritt. Charakteristische Akzessorien beider Gruppen sind Rutil, Titanit und Apatit.

Der Versuch, die Amphibolite mit Hilfe der Ilmenit- oder Feldspatgehalte zu unterteilen brachte kein stratigraphisch verwertbares Ergebnis, so daß hier die geochemischen Kriterien vorgezogen werden müssen. Die chemischen Analysen zeigen, daß die Amphibolite anhand der Zr- und Rb-Gehalte in zwei Gruppen unterteilt werden können. Die Zr-reichen und Rb-armen Amphibolite I beschränken sich auf den südöstlichen Teil des Arbeitsgebietes, während die Zr-armen und Rb-reichen Amphibolite II im gesamten Gebiet vertreten sind. In Pro-



fil D können letztere aufgrund der Lagerungsverhältnisse als jünger eingestuft werden, was durch die geochemischen Untersuchungen bestätigt wird.

Ein charakteristischer Bestandteil des Amphibolitkomplexes sind die Ultramafitite, die entsprechend ihrer Basizität als Talk-Anthophyllitschiefer oder Chlorit-Tremolit-Hornblendegesteine ausgebildet sind, wobei letztere aufgrund ihrer Pseudomorphosen nach Pyroxen als Metapyroxenite angesprochen werden. Die Talk-Anthophyllitschiefer markieren die Ost- bzw. die Nordwestgrenze des Amphibolitkomplexes und sind wahrscheinlich an prämetamorphe Störungszonen gebunden. Die Metapyroxenite bilden mit den jüngeren Amphiboliten II und quarzreichen Sedimenten Wechselfolgen aus, die im Zentrum des Amphibolitkomplexes z. T. nahezu horizontal gelagert sind (Profil C) oder im Apatit-Pyroxenit (Profil B, C) und den Amphiboliten I muldenförmige Einschaltungen ausbilden. Die sedimentären Zwischenlagen bestehen im wesentlichen aus Quarziten, pyroxenhaltigen Hornblende-quarziten und Biotitgneisen. Die Quarzite sind wahrscheinlich als chemisch-klastische Sedimente anzusprechen, wobei spezifische Anteile von diopsidischem Augit und bläulichen Quarzkörnern den Apatit-Pyroxenit bzw. den Metagranodiorit als Liefergebiete kennzeichnen. Das Hangende des Amphibolitkomplexes ist durch abnehmende Intensität der vulkanischen Aktivität gekennzeichnet, was sich durch erhöhte Metasedimentanteile sowie durch das Fernbleiben ultramafischer Extrusiva ausdrückt (Profil G). Die Amphibolite werden schließlich mit Ausnahme weniger dünner Lagen vollständig durch Metasedimente abgelöst, die sich im wesentlichen aus biotit- und chlorithaltigen Gneisen und Schieferen zusammensetzen und stellenweise durch hohe Tourmalin-gehalte charakterisiert sind. Die Metasedimente können hinsichtlich



des Liefergebietes in zwei Gruppen geteilt werden: Die Schiefer und Gneise im Norden (Profil G und H) können aufgrund der schon erwähnten milchig bläulichen Quarzkörner als Erosionsprodukte des Metagranodiorits identifiziert werden, während diese Quarzkörner mit Ausnahme einer Quarzitlage im Nordwesten (Profil A) nicht vorhanden sind. Dies bedeutet, daß in näherer Umgebung des Amphibolitkomplexes über dem Meeresspiegel gelegene Krustenpartien von saurer bis intermediärer Zusammensetzung existiert haben müssen.

Die abgesehen von Bruchtektonik und Erosion letzte Phase der geologischen Entwicklung des Amphibolitkomplexes ist durch die Auswirkungen einer hochtemperierten Regionalmetamorphose geprägt. Migmatisierungerscheinungen an Gneisen granitischer Zusammensetzung (Profil C, G) weisen auf hohe  $P_{H_2O}$ -T-Bedingungen hin, die in tieferen Krustenpartien zur anatektischen Bildung von Graniten (Profil A) mit den assoziierten beryll- und turmalinhaltigen Pegmatiten (Profil A, B, E, F) geführt haben. Diese Vorgänge beschränken sich auf die Randgebiete des Amphibolitkomplexes, während sich dieses thermische Ereignis im Zentrum fast ausschließlich durch Quarzadern und nur untergeordnet durch glimmerfreie Quarz-Feldspat-Mobilisate ausdrückt. Dies läßt die Folgerung zu, daß der Untergrund des Amphibolitkomplexes überwiegend aus basischem Material zusammengesetzt sein muß. Der Widerspruch zu HUBBARD (1975), nach dessen Auffassung der Amphibolitkomplex die Migmatit-Gneis-Granit-Abfolgen überlagert, wird durch Amphibolitxenolithe in den Migmatiten südlich von Itagunmodi (Profil F) erhärtet.



### 3.3. Die Ifewarastörung

Die Ifewarastörung grenzt den Amphibolitkomplex im Osten von den Metasedimentabfolgen ab. Die Geländebefunde sowie die Satellitenbildlineationen (SCHNEIDER, in Vorbereitung) und die geochemischen Kartierungen von MATHEIS (1976, 1977) widersprechen dem in der geologischen Karte von DE SWARDT et al. (1965) angegebenen Störungsverlauf. Es handelt sich vielmehr um ein prämetamorph angelegtes Störungssystem (Metamylonite), das in Übereinstimmung mit HUBBARD (1975) wieder reaktiviert wurde und für die Absenkung der Metasedimente verantwortlich ist.

Dieses Störungssystem, das nach HUBBARD (1975) im Süden Nigerias sogar noch durch die kretazische Sedimentbedeckung erkannt werden kann, läßt sich mit Frakturzonen ähnlichen Streichens in Nordnigeria korrelieren, das ebenfalls mit metavulkano-sedimentären Abfolgen in Verbindung steht. Dieser über große Entfernungen zu beobachtende Zusammenhang der 'Schist belts' mit diesen Störungssystemen deutet auf eine Schwächezone in der Erdkruste hin, die schon im frühen Präkambrium angelegt worden ist und sehr wahrscheinlich als Ursache für die magmatischen Aktivitäten entlang dieser Zone betrachtet werden kann.

Ein weiteres Verwerfungssystem gleicher Dimension verläuft parallel weiter im Westen Nigerias bzw. in Ghana und ist ebenfalls mit metavulkano-sedimentären Abfolgen gekoppelt. Abbildung 4 zeigt, daß beide Störungssysteme ohne große Richtungsänderungen in die Romanche- bzw. die Chain-Frakturzonen des atlantischen Meeresbodens übergeleitet werden können. Obwohl Überschneidungen dieser Frakturen mit der südamerikanischen Küste bekannt sind (FRANCHETEAU & LE PICHON, 1972), konnten analoge kontinentale Störungen dort bisher noch nicht entdeckt werden. Trotzdem ist es nach WRIGHT (1976) wahrscheinlich,



daß die Form der afrikanischen und südamerikanischen Kontinentalränder durch Schwächezonen in der präkambrischen Erdkruste vorgegeben worden ist.

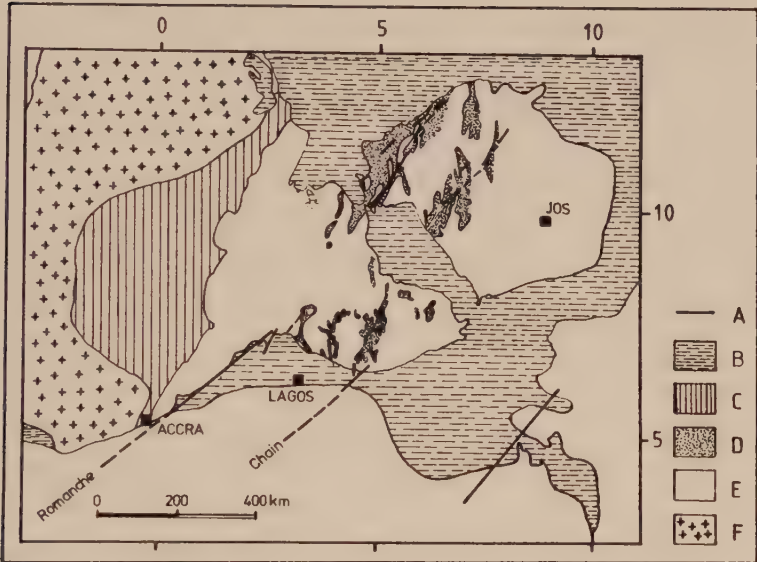


Abb. 4: Schnittpunkte atlantischer Störungszonen mit der Golfküste von Guinea und den zwei Hauptstörungssystemen in Nigeria (nach WRIGHT, 1976)

A = Hauptstörungszonen, B = Kreide und jüngere Sedimente, C = Buem - Togo - Voltaian Sedimente, D = Metasedimentgürtel, Kibaran bis Pan-African (1100 ? - 500 Mio. J.), E = Gneise und Granite des kristallinen Basements, Dahomeyan bis Pan-African (2000 - 500 Mio. J.), F = Westafrikanischer Kraton.

### 3.4. Der Amphibolitkomplex im Vergleich mit den archaischen Greenstonebelts

Die Vulkanitabfolgen des frühen Präkambriums können anhand der stratigraphischen Stellung und spezifischer Gesteinsassoziationen



in zwei Gruppen unterteilt werden (GLIKSON, 1975).

1. Die primären 'Greenstones' sind durch Zyklen mafischer bis ultramafischer Vulkanite (Komatiite) charakterisiert, die untergeordnet intermediäre bis saure Komponenten enthalten können. Die geringmächtigen sedimentären Einschaltungen sind entweder geochemischer Natur oder Abtragungsprodukte der umgebenden Vulkanite.

2. Die jüngeren sekundären 'Greenstones' bestehen aus einer bimodalen mafisch-felsischen und/oder kalkalkalischen Vulkanitabfolge, die untergeordnet eine ultramafische Komponente enthält. Ihre Bildung erfolgte in linearen Trögen und sie liegen diskordant den primären 'Greenstones' oder einem granitischen Basement auf. Die z. T. mächtigen Sedimenteinschaltungen können von den umliegenden Graniten und Vulkaniten abgeleitet werden.

Die primären und sekundären 'Greenstones' werden von mächtigen Sedimentabfolgen pelitischer bis psammitischer Zusammensetzung (u. a. 'banded iron formations') überlagert, die z. T. saure Vulkanite enthalten.

Die metavulkano-sedimentären Abfolgen östlich von Ife/SW-Nigeria könnten von ihrem Aufbau aus gesehen durchaus einen archaischen 'Greenstonebelt' darstellen, wobei die Mafitite und Ultramafitite des Amphibolitkomplexes den primären 'Greenstones' entsprechen würden. Die mächtigen Metasedimente im Hangenden weisen nach SCHNEIDER (in Vorbereitung) ebenfalls große Ähnlichkeiten mit den archaischen Sedimenten auf, welche die 'Greenstones' überlagern. Es fehlen die mafisch-felsischen bzw. kalkalkalischen Vulkanite, woraus zu schließen ist, daß die vulkanische Aktivität in diesem Gebiet vorzeitig beendet worden ist.

Es kann allerdings ein direkter Vergleich zu den archaischen



Grüngesteinsgürteln des Westafrikanischen Kratons in Sierra Leone gezogen werden, deren lithologischer Aufbau mit dem des Amphibolitkomplexes nahezu identisch ist (siehe STRASSER - KING, 1980; HURLEY et al., 1971; MARMO, 1957).

Die Apatit-Pyroxenite sind die einzige Gesteinsgruppe die nicht in das Bild der bekannten archaischen 'Greenstonebelts' passen. Vergleichbare Gesteine sind aber im archaischen 'Ancient gneiss complex' in Swaziland/Südafrika mit Granodioriten und Tonaliten assoziiert (HUNTER, 1974). Nach GLIKSON (1975) könnte der 'Ancient gneiss complex' die hochmetamorphe Wurzelzone der dortigen Grüngesteinsabfolgen (Barberton Mountain Land) darstellen, während HUNTER (1974) es für möglich hält, daß die Bildung dieser Abfolgen noch vor der eigentlichen 'Greenstonebelt'-Entwicklung stattgefunden hat.

#### 4. Geochemie

##### 4.1. Einleitung

Die schlechten Aufschlußverhältnisse im tropischen Regenwald, die metamorphe Überprägung der Gesteine, sowie die komplizierten Lagerungsverhältnisse im Bereich des ehemaligen Störungssystems erschweren eine Einordnung des Amphibolitkomplexes in seine geologische Umgebung. Die Ausführungen über die regionale Geologie haben gezeigt, daß die unterschiedlichen Metamorphosealter und der Mangel an lithologisch-stratigraphischen Korrelationen innerhalb des SW-nigerianischen Basements einen Vergleich mit äquivalenten präkambrischen Abfolgen verhindern.



Mit Hilfe der geochemischen Untersuchungen soll versucht werden, die einzelnen Magmatypen zu charakterisieren und mögliche Gemeinsamkeiten und ihre Genese aufzuzeigen. Weiterhin wird geprüft, ob die Amphibolite sich mit jungen Basalten der verschiedenen geotektonischen Positionen und der Amphibolitkomplex als Ganzes mit den archaischen Greenstonebelts vergleichen lassen.

#### 4.2. Arbeitsmethoden

Für die geochemischen Untersuchungen wurden im Rahmen der Geländetätigkeit ca. 600 Proben genommen, von denen ungefähr 450 zur Bearbeitung kamen.

Die Gesteinsproben wurden im Backenbrecher zerkleinert, anschließend heruntergeviertelt und je 50 g in der Widia-Scheibenschwingmühle fein gemahlen. Die  $\text{H}_2\text{O}^-$ -Bestimmung erfolgte durch 40-minütiges Erhitzen im Trockenschrank bei  $110^\circ \text{C}$ ; der Glühverlust (G.V.) wurde nach  $1\frac{1}{2}$ -stündigem Glühen bei  $900^\circ \text{C}$  gemessen.

Für die Röntgenfluoreszenzanalyse wurde das geglühte Pulver mit Lithiumtetraborat als Flußmittel im Verhältnis von 1 : 2 gemischt und mit Hilfe eines Induktionsschmelzofen zu Schmelztabletten gegossen.

Die Analysen wurden an einem vollautomatisierten energiedispersiven Röntgenfluoreszenzanalysator (EDRFA) vom Typ TEFA 6111 (Fa. ORTEC) mit 32 K - PDB - 10/04 - Computer und 2 Drive - AED - Floppy Disk - Speichereinheiten durchgeführt. Die für die automatischen Analysen notwendigen Meßprogramme (Berechnungen der Eichkurven, Matrixkorrekturen) sind von Priv. Doz. Dr. WEBER-DIEFENBACH erarbeitet worden. In Tabelle 1 ist die Reproduzierbarkeit der Messungen wiedergegeben. Die Ergebnisse können als gut bezeichnet werden, wenn die relative



Standardabweichung kleiner als 3 ist (WEBER-DIEFENBACH, 1979).

Tabelle 1:

|                                | Bereich |         | $\bar{x}$ | s     | c    |
|--------------------------------|---------|---------|-----------|-------|------|
| SiO <sub>2</sub>               | 55.13   | - 56.33 | 55.58     | 0.330 | 0.59 |
| TiO <sub>2</sub>               | 1.96    | - 2.00  | 1.97      | 0.011 | 0.55 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 15.16   | - 15.66 | 15.40     | 0.117 | 0.76 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 9.38    | - 9.50  | 9.44      | 0.033 | 0.35 |
| MnO                            | 0.129   | - 0.14  | 0.134     | 0.004 | 2.98 |
| MgO                            | 3.12    | - 3.64  | 3.31      | 0.015 | 0.45 |
| CaO                            | 5.36    | - 5.47  | 5.41      | 0.029 | 0.53 |
| Na <sub>2</sub> O              | 3.20    | - 3.71  | 3.42      | 0.112 | 3.27 |
| K <sub>2</sub> O               | 3.47    | - 3.51  | 3.49      | 0.023 | 0.65 |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 1.31    | - 1.43  | 1.37      | 0.036 | 2.62 |

$\bar{x}$  = arithmetisches Mittel

s = Standardabweichung

c = rel. Standardabweichung

Tab. 1: Reproduzierbarkeit der Messungen am Röntgenfluoreszenzanalysator (WEBER-DIEFENBACH, 1979)

Meßzeit 200 s

n = 19

Alle Hauptelementmessungen in Gew.-%, Spurenelementmessungen in ppm.

Proben mit Chromwerten von > 2000 ppm wurden mit Hilfe der Atomabsorptionsanalyse korrigiert (Methoden siehe WAGNER 1976). 43 repräsentative Fe<sup>2+</sup>/Fe<sup>3+</sup>-Messungen sind von Herrn NADLER vom Institut für Mineralogie und Petrographie der Universität München erstellt worden. 6 Übersichtsanalysen der Au-Gehalte wurden von Dr. H. STÄRK (TU München-Garching) durchgeführt.



#### 4.3. Geochemische Unterteilung des Amphibolitkomplexes

Die Analysenwerte zeigen übereinstimmend mit den petrographischen Ergebnissen, daß der Amphibolitkomplex ohne Berücksichtigung der Granite und Metasedimente in fünf Hauptgesteinstypen unterteilt werden kann:

1. Ca-reiche Apatit-Pyroxenite
2. Metagranodiorit
3. Amphibolite
4. Metapyroxenite
5. Mg-reiche Talk-Anthophyllitschiefer

Tabelle 2 (siehe Anhang) zeigt die mittlere Zusammensetzung und den Variationsbereich dieser Gesteinsgruppen.

Die Ca-reichen Apatit-Pyroxenite zeichnen sich durch niedrige  $\text{SiO}_2$ - und Alkaligehalte sowie z. T. hohe  $\text{P}_2\text{O}_5$ -Konzentrationen aus. Weitere wichtige Identifikationsmerkmale sind das niedrige Ti/P-Verhältnis und die geringen Gehalte an Ni und Cr; im Chemismus vergleichbare Olivinmelilithite weisen grundsätzlich höhere Alkalikonzentrationen auf.

Der Metagranodiorit zeigt, bedingt durch die unregelmäßige Verteilung der mafischen Komponenten, große Unterschiede bei vielen Elementen. Charakteristisch sind jedoch hohe Gehalte an CaO,  $\text{P}_2\text{O}_5$ , Cr und Sr. Die mafischen Proben dieser Gruppe besitzen nahezu den gleichen Chemismus wie die  $\text{SiO}_2$ -reicheren Apatit-Pyroxenite. Der Metagranodiorit zeichnet sich ebenso wie die erste Gruppe durch ein niedriges Ti/P-Verhältnis aus.

Die Amphibolite stellen den dominierenden Gesteinstyp im Arbeitsgebiet dar; sie sind durch niedrige  $\text{SiO}_2$ - und  $\text{Na}_2\text{O}$ -Konzentrationen,



hohe  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -Werte, hohe  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ -Verhältnisse und einer großen Variation der  $\text{TiO}_2$ -Gehalte charakterisiert. Aufgrund der geologischen Verhältnisse und der Spurenelementgehalte wurden die Amphibolite in eine Zr-reiche und eine Zr-arme Gruppe unterteilt. Die Zr-reichen Amphibolite I unterscheiden sich von den Zr-ärmeren Amphiboliten II im wesentlichen durch niedrigere Rb-Werte und höhere Konzentrationen an Fe, Ti, V, Cr, Zn und Y.

Die Talk-Anthophyllitschiefer können aufgrund unterschiedlicher MgO-Gehalte grob in zwei Gruppen unterteilt werden. Die MgO-reichen Proben zeichnen sich durch hohe  $\text{SiO}_2$ -Gehalte und niedrige  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -Konzentrationen aus, während für die MgO-armen Typen niedrige  $\text{SiO}_2$ - und hohe  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -Gehalte typisch sind. Die geringen Konzentrationen an Na und Ca sind wahrscheinlich auf den meist verwitterten Zustand dieser Gesteine zurückzuführen.

Die Metapyroxenite können vom Chemismus her als Komatiite angesprochen werden, für die nach BROOKS & HART (1974) folgende Kriterien gelten:  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3 > 1$ ;  $\text{MgO} > 9 \%$ ,  $\text{TiO}_2 < 0.9 \%$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  maximal  $0.9 \%$ , aber meist  $< 0.5 \%$ . ARNDT (1977) unterteilt die Komatiite anhand der MgO-Gehalte in basaltische ( $< 12 \%$ ), pyroxenitische ( $12 - 20 \%$ ) und peridotitische ( $> 20 \%$ ). Ein Großteil der Metapyroxenite wäre demnach als pyroxenitische Komatiite anzusprechen. Die restlichen Proben weisen verwitterungsbedingte CaO und  $\text{SiO}_2$ -Verluste auf. Charakteristisch für die Metapyroxenite sind hohe  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -Gehalte, die auch bei den unverwitterten Proben in einigen Fällen über  $20 \%$  betragen.

#### 4.4 Der Einfluß von Verwitterung und Metamorphose

Eine Auswertung der geochemischen Daten, bzw. eine Charakterisierung der verschiedenen Gesteinstypen sollte nicht ohne Berücksichtigung



von Stoffwanderungen, hervorgerufen durch Verwitterung und Metamorphose, erfolgen.

#### 4.4.1. Metamorphose

Die Regionalmetamorphose ist nach WINKLER (1979) im wesentlichen ein isochemischer Prozess, wobei die volatilen Komponenten, überwiegend  $H_2O$  und  $CO_2$ , die Ausnahme bilden. RONOVIČ et al. (1977) zeigten an regionalmetamorph überprägten Sedimenten, daß neben  $H_2O$  und  $CO_2$  im geringeren Ausmaß auch Schwefel, Chlor, Bor, Quecksilber, Uran, Cadmium und möglicherweise auch die schweren Lanthaniden mobil sein können. Aufgrund dieser Aussagen kann davon ausgegangen werden, daß während der metamorphen Überprägung des Amphibolitkomplexes keine Stoffwanderungen aufgetreten sind, die die Konzentration der im Rahmen dieser Arbeit gemessenen Elemente über ihren natürlichen Variationsbereich hinaus verändert haben.

Die Mobilität der volatilen Komponenten kann sowohl bei der Metamorphose als auch bei den im Anschluß besprochenen Verwitterungsformen eine Veränderung des  $Fe^{3+}/Fe^{2+}$ -Verhältnisses zur Folge haben, wobei aber die Oxidation von FeO wesentlich häufiger als die Reduktion von  $Fe_2O_3$  ist (IRVINE & BARAGAR, 1971). Die Beobachtung, daß  $Fe_2O_3$  und  $TiO_2$  generell ähnliche Variationstrends in unveränderten Vulkaniten aufweisen, gab den genannten Autoren den Anlaß, eine obere Grenze für die  $Fe_2O_3$ -Gehalte festzulegen, die auf folgender Gleichung basiert:  $\% Fe_2O_3 = \% TiO_2 + 1.5$ .

Ist der Analysenwert kleiner als  $\% TiO_2 + 1.5$ , dann können nach IRVINE & BARAGAR (1971) die Metavulkanite als unverändert betrachtet werden.

Auf der Basis dieser Überlegungen wurden die  $Fe_2O_3$ -Gehalte der Amphibolite gegen den hypothetischen Wert von  $\% TiO_2 + 1.5$  aufge-



tragen. Die Abbildung 5 zeigt, daß der größte Teil der Amphibolitproben in den Bereich unterhalb der von IRVINE & BARAGAR angegebenen

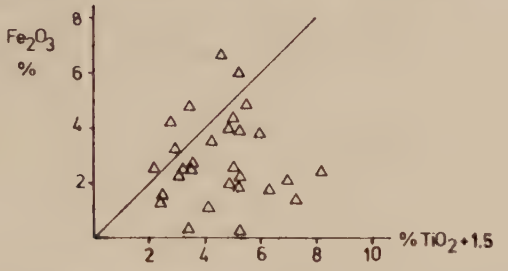


Abb. 5: Diagramm  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  -  $\text{TiO}_2 + 1.5$ .

Nach IRVINE & BARAGAR (1971) können die Metavulkanite als unverändert betrachtet werden, wenn %  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  kleiner als %  $\text{TiO}_2 + 1.5$  ist.

Toleranz fällt. Eine positive Korrelation zwischen  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  und  $\text{TiO}_2$  ist jedoch nicht vorhanden; die Streubreite dieser Proben sowie die im Dünnschliff zu beobachtenden Umwandlungen von Pyroxen in Hornblende und Chlorit zeigen, daß lokale chemische Reaktionen zwischen Gestein und fluider Phase stattgefunden haben. Eine Oxidation im größeren Maßstab kann aber aufgrund dieses Diagramms ausgeschlossen werden.

#### 4.4.2. Oberflächenverwitterung

Der Einfluß terrestrischer Verwitterung auf den Stoffhaushalt der untersuchten Proben kann mit Hilfe der Ultramafitite geprüft werden, da diese z. T. in erheblich verwittertem Zustand vorliegen. Zu diesem Zweck werden drei Metapyroxenitproben (F 88, 89, 90) miteinander verglichen, die in geringem Abstand dem gleichen Aufschluß entnommen wurden und die aufgrund ihrer Farbe und Festigkeit als unverwittert, gering und stark verwittert angesprochen werden (Tabelle 3).



Tabelle 3

Mobilität der Elemente Si, Al, Fe, Mg, Ca, Na und K bei der Oberflächenverwitterung

| Verwitterungs-<br>grad | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO   | CaO  | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | G.V. |
|------------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|-------------------|------------------|------|
| -                      | 48.45            | 4.99                           | 11.64                          | 19.81 | 9.72 | 0.98              | 0.15             | 1.23 |
| +                      | 48.25            | 7.70                           | 16.30                          | 16.61 | 4.78 | 0.87              | 0.14             | 3.77 |
| ++                     | 45.01            | 7.80                           | 23.54                          | 15.50 | 1.62 | 0.85              | 0.26             | 5.00 |

Die Tabelle 3 vermittelt folgende Erkenntnisse: Im Anfangsstadium der Verwitterung wird zuerst Ca und in geringerem Maß Mg herausgelöst und das Defizit durch Anreicherung von Fe, Al und H<sub>2</sub>O kompensiert. Bei weiterer Zersetzung wird weiterhin Ca, aber schließlich auch Si abtransportiert, die wiederum durch Fe und H<sub>2</sub>O ersetzt werden, während Al und Mg relativ stabil bleiben. Die Elemente Ca und Fe sind demnach bei der Oberflächenverwitterung am mobilsten, wobei der H<sub>2</sub>O-Gehalt (G.V.) als Maßstab für den Fortschritt der Verwitterung dienen kann.

Das hohe CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Verhältnis ist ein wichtiges Kriterium für den komatiitischen Chemismus. Um zu prüfen, ob auch die verwitterten Ultramafitite als Komatiite angesprochen werden können, wurde aufgrund obiger Erkenntnisse der Glühverlust gegen das CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Verhältnis aufgetragen (Abb. 6). Es ergibt sich eine zwar breit gestreute, aber doch gut erkennbare negative Korrelation, die aussagt, daß die verwitterten Metapyroxenite und wahrscheinlich auch die Talk-Anthophyllitschiefer ursprünglich einen komatiitischen Chemismus aufweisen.

Bei den Amphiboliten wurde nur frisches Material beprobt; eine



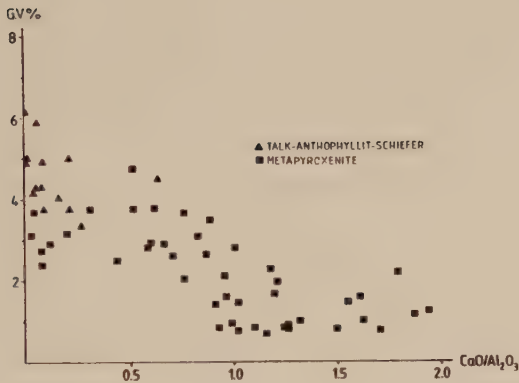


Abb. 6: Variationsdiagramm G.V. -  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ : Das  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ -Verhältnis nimmt bei zunehmendem Glühverlust ab.

prämetamorphe Oberflächenverwitterung wäre aber durchaus denkbar. In Tabelle 3 ist zu sehen, daß Calcium bei Verwitterungseinflüssen am empfindlichsten reagiert. Die Amphibolite sind jedoch gerade durch hohe CaO-Gehalte charakterisiert. Eine prämetamorphe Oberflächenverwitterung kann deshalb ausgeschlossen werden.

#### 4.4.3. Submarine Verwitterung

Die im Rahmen der Tiefseebodenbohrungen durchgeführten Untersuchungen an Ozeanbodenbasalten brachten neue Erkenntnisse über submarine Alterationsprozesse. EISENACH (1979) gibt bezüglich der Elementmobilität eine gute Zusammenfassung der bisherigen Ergebnisse wie auch experimenteller Untersuchungen: Hochtemperaturveränderungen



an Ozeanbodenbasalten ( $200^{\circ} - 500^{\circ} \text{ C}$ ), auch Hydrothermalmetamorphose genannt, bewirkt eine Zunahme an Mg und Na bei gleichzeitigem Verlust an Si, Ca, K, Fe und Mn. Die Tieftemperaturveränderung ( $0 - 25^{\circ} \text{ C}$ ) ist durch eine Erhöhung des  $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ -Verhältnisses, zunehmende Gehalte an K und  $\text{H}_2\text{O}$  und durch Abnahme von Mg, Ca und Si gekennzeichnet, während über das Verhalten von Al, Mn, Fe-Gesamt, Ti und Na widersprüchliche Aussagen bestehen (EISENACH, 1979). Nach COISH (1977) kann Ca in den Ozeanbodenbasalten auch angereichert werden. Das Meerwasser ist reich an  $\text{Ca}^{2+}$  und  $\text{HCO}_3^-$ . Wenn beim Durchdringen von wärmeren Krustenpartien die Wassertemperatur erhöht wird, dann sinkt die Löslichkeit von  $\text{CaCO}_3$  drastisch und Calcit wird ausgefällt. Wird der Glühverlust (G.V.) gegen die genannten Elemente aufgetragen, dann sollten sich beim Einfluß von submariner Verwitterung entweder positive oder negative Korrelationen ergeben (s. COISH, 1977). In Abb. 7 ist zu sehen, daß die Elemente Na, Ca, Mg und Si in den untersuchten Amphiboliten keinerlei Abhängigkeiten vom Glühverlust zeigen und somit keine durch wässrigen Transport verursachten Elementmobilitäten vorliegen. Zusätzlich ist zu bemerken, daß die Na-Gehalte und der Glühverlust wesentlich unter denen der submarin veränderten Basalte liegen. Weiterhin tritt mit Ausnahme von winzigen Einschlüssen in den Plagioklasen kein Calcit und Epidot auf.

#### 4.4.4. Zusammenfassung

Die Aussagen über den Einfluß von Metamorphose und Verwitterung auf den Chemismus der untersuchten Proben kann wie folgt zusammengefaßt werden: Die chemische Zusammensetzung der Amphibolite ist als primär anzusehen; der Einfluß der Metamorphose beschränkt sich auf geringfügige Veränderungen des  $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ -Verhältnisses und auf



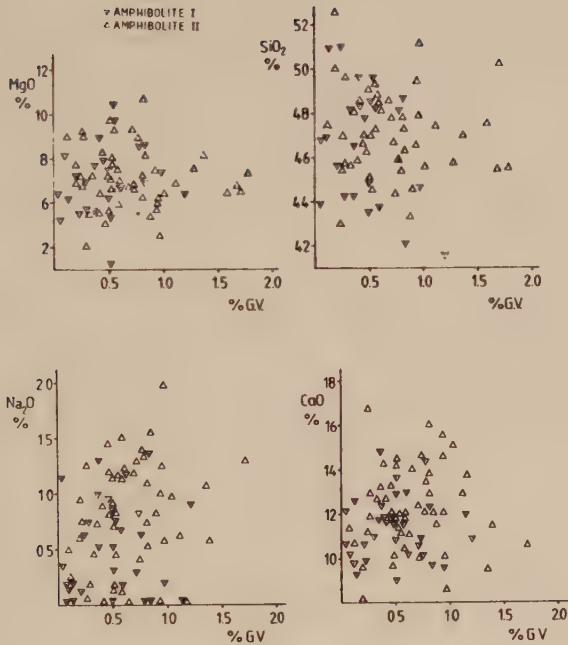


Abb. 7: Variationsdiagramme G.V. - SiO<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>O, MgO und CaO. Diese Elemente zeigen bei den Amphiboliten keine Abhängigkeiten vom Glühverlust.

eine Erhöhung des H<sub>2</sub>O-Gehaltes. Ein Teil der Metapyroxenite sowie die Talk-Anthophyllitschiefer weisen verwitterungsbedingte Ca-Verluste auf und sind deshalb wie die unverwitterten Metapyroxenite im chemischen Sinne als Komatiite anzusprechen.



#### 4.5. Komatiite

Eine rein auf der chemischen Zusammensetzung beruhende Bezeichnung der Metapyroxenite als Komatiite ist nicht ausreichend. Ein vergleichbarer Chemismus kann ebenso durch fraktionierende Kristallisation von Olivin und Klinopyroxen entstehen. Spinifex- oder Quenchstrukturen, die den Extrusivcharakter einer kristallfreien ultramafischen Schmelze belegen könnten, sind aufgrund des hohen Metamorphosegrades nicht mehr zu finden.

Folgende Argumente sprechen jedoch dafür, daß die Ultramafitite als kristallfreie, extrusive Schmelzen betrachtet werden können:

- Sie sind homogen und z. T. konkordant in dünnen Lagen zwischen Gneisen und Quarziten eingelagert, so daß eine akkumulative Bildung aus einem basaltischen Magma ausgeschlossen werden kann.
- Mit Ausnahme der stark verwitterten Fe-reichen Proben, besitzen die Ultramafitite hohe  $\text{SiO}_2$ -Gehalte. Bei Kristallisationsvorgängen während des Magmenaufstiegs wird in Oberflächennähe fast immer Olivin gebildet. Eine Olivinanreicherung hätte jedoch geringere  $\text{SiO}_2$ -Gehalte zur Folge und kann somit vernachlässigt werden.
- Im Kapitel über die Genese des Amphibolitkomplexes wird aufgezeigt, daß fraktionierende Kristallisation nicht die Ursache für die Bildung der Ultramafitite gewesen sein kann. Eine Deutung der Ultramafitite als Olivin- oder auch Pyroxenakkumulate kommt also grundsätzlich nicht in Betracht.

Die hohen  $\text{SiO}_2$ -Gehalte stellen ein spezielles Problem dar, auf das später noch ausführlich eingegangen werden soll.



#### 4.6. Geochemische Charakterisierung

##### 4.6.1. Ortho- oder Paragesteine

Die makroskopischen und mikroskopischen Untersuchungen haben gezeigt, daß die mafischen und ultramafischen Gesteine nur eine metamorphosebedingte Schieferung aufweisen; sedimentäre und geopedale Texturen, wie feinrythmische Wechsellagerungen oder Bänderungen, die auf Metapelite und Metataffite hindeuten würden, konnten nicht beobachtet werden, so daß die untersuchten Gesteine zunächst wohl als ehemalige Magmatite zu betrachten sind.

Zusätzlich sollen jedoch einige geochemische Parameter berücksichtigt werden: Die Talk-Anthophyllitschiefer und die Metapyroxenite können aufgrund ihrer hohen Ni- und Cr-Gehalte ohne weitere Diskussion als orthogene Gesteine betrachtet werden. Für die Trennung von Ortho- und Paraamphiboliten gibt LAPADU-HARGUES (1959)  $\text{TiO}_2$ -Gehalte von  $< 0.8 \%$  für die Metasedimente und  $> 0.8 \%$  für die Magmatite an. Dieser Grenzwert kann mit Ausnahme einiger Inselbogentholeiite, pikritischen Basalten und Plagioklasakkumulaten von Ozeanbodenbasalten im allgemeinen bestätigt werden. Die  $\text{TiO}_2$ -Gehalte der untersuchten Amphibolite liegen alle über  $0.8 \%$ , was ein weiterer Hinweis auf die orthogene Herkunft dieser Gesteine ist.

Nach SCHROLL (1976) spricht neben Ni-Gehalten  $> 50$  ppm sowie Cr-Gehalten  $> 140$  ppm und eine positive Ni-Cr-Korrelation ebenfalls für orthogenes Ausgangsgestein. Das Ni-Cr-Variationsdiagramm (Abb. 8) bildet eine gut erkennbare positive Korrelation im Bereich niedriger Cr-Ni-Konzentrationen ab, obwohl eine gewisse Streubreite nicht zu übersehen ist. An dieser Stelle muß jedoch erwähnt werden, daß eine deutlich positive Korrelation nur bei überwiegendem Einfluß fraktio-



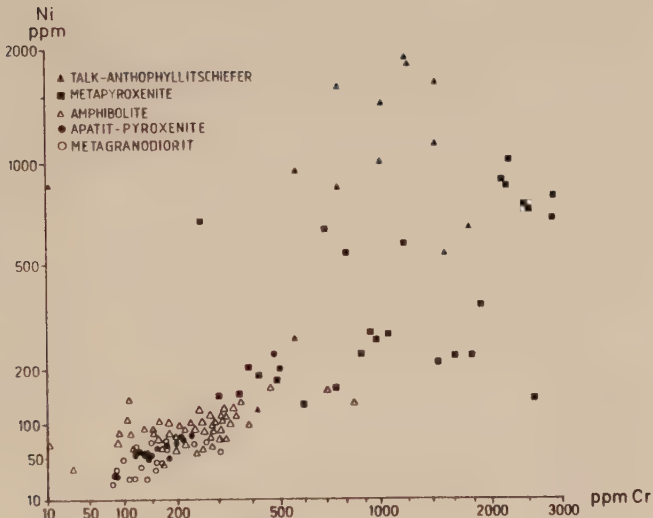


Abb. 8: Variationsdiagramm Ni - Cr. Die positive Korrelation im Bereich niedriger Elementkonzentrationen spricht für orthogenes Ausgangsmaterial.

nierender Kristallisation bei der Magmagenese zu erwarten ist. Bei einem Magma, dessen Charakter allein durch partielles Aufschmelzen bestimmt wird, ist die Spuren- und Nebenelementverteilung im wesentlichen von der Zusammensetzung des oberen Erdmantels sowie von der Stabilität einzelner Mineralphasen unter verschiedenen P-T-Bedingungen abhängig. Für die Variation der Cr- und Ni-Gehalte innerhalb einer vulkanischen Abfolge bedeutet dies, daß die Vulkanite insgesamt eine positive Korrelation aufweisen, aber in Bereichen gleicher Ni- oder Cr-Konzentrationen eine größere Streubreite zu erwarten ist.



#### 4.6.2. Klassifizierung der Metabasalte

Die basischen Vulkanite der Erde können nach MIYASHIRO (1975) in zwei Hauptgruppen unterteilt werden und zwar in alkalische und subalkalische. Die Korrelation  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$  (Abb. 9) folgt einer Klas-

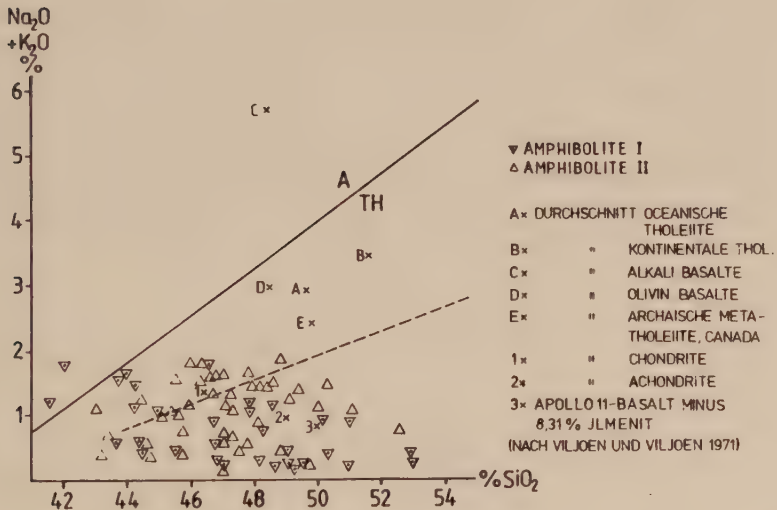


Abb. 9: Variationsdiagramm  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ . Die Metabasalte des Amphibolitkomplexes weisen mit wenigen Ausnahmen tholeiitischen Charakter auf. Keiner der Hawaiiibasalte fällt unter die gestrichelte Linie.

sifikation für Hawaii-Basalte von MAC DONALD & KATSURA (1964), welche mit Ausnahme von zwei Proben deutlich den subalkalischen Charakter der Amphibolite aufzeigt. Keiner der Hawaiiibasalte fällt unter die gestrichelte Linie. Im Vergleich zu jungen und archaischen Basalten haben die Amphibolite wesentlich geringere Alkaliwerte, die auf dem



Niveau von Meteoriten und Mondgestein liegen. Bei den Zr-reichen Amphiboliten I ist eine schwache negative Korrelation zu beobachten, woraus zu schließen ist, daß die Alkaliegehalte nicht vom Feldspat sondern wahrscheinlich von Pyroxen kontrolliert werden.

Die subalkalischen Basalte werden in Tholeiite und kalkalkalische Basalte unterteilt. Letztere beschränken sich auf Orogene, die an Subduktionszonen gebunden sind. Die niedrigen  $\text{SiO}_2$ - und die hohen  $\text{TiO}_2$ -Gehalte der Amphibolite sprechen gegen einen kalkalkalischen Charakter. Die Unterscheidung zwischen Tholeiiten und kalkalkalischen Serien kann nach IRVINE & BARAGAR (1971) mit dem AFM-Diagramm vorgenommen werden. Abb. 10 zeigt, daß die untersuchten Amphibolite

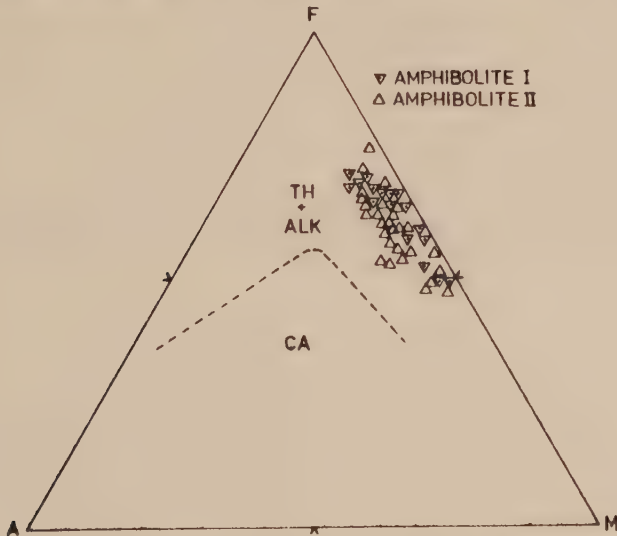


Abb. 10: AFM - Diagramm (nach IRVINE & BARAGAR, 1971) zur Unterscheidung von tholeiitischen und kalkalkalischen Tholeiiten. A =  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ , F = Gesamteisen als FeO, M = MgO, TH = tholeiitisch, ALK = alkalisch, CA = kalkalkalisch.



deutlich tholeiitischen Charakter aufweisen.

Das Diagramm  $\text{FeO}-\text{FeO}/\text{MgO}$  nach MIYASHIRO & SHIDO (Abb. 11) dient dem

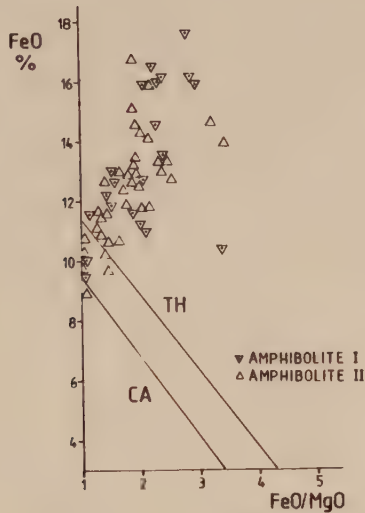


Abb. 11: Variationsdiagramm  $\text{FeO}-\text{FeO}/\text{MgO}$  (nach MIYASHIRO & SHIDO, 1975). CA = Kalkalkalifeld, Th = Tholeiitfeld. Gesamteisen ist als FeO angegeben.

gleichen Zweck. Erwartungsgemäß fallen die Amphibolite im wesentlichen in das Tholeiitfeld. Auffällig ist jedoch, daß die eisenarmen und magnesiumreichen Proben einen Trend zum Kalkalkalifeld aufweisen. Dies könnte möglicherweise ein Hinweis auf die Bildungsweise der Amphibolite und der mit ihnen assoziierten Ultramafitite zu verstehen sein.



Die Spurenelementgehalte der Amphibolite sind für Tholeiitbasalte sehr ungewöhnlich. Nach WINCHESTER & FLOYD (1976) können anhand der Elemente Ti, P und Zr Tholeiitbasalte von Alkalibasalten unterschieden werden. Die Diagramme  $\text{Zr}-\text{P}_2\text{O}_5$  (Abb. 12) und  $\text{Ti}-\text{Zr}/\text{P}_2\text{O}_5$  (Abb. 13) nach WINCHESTER & FLOYD (1976) zeigen die überraschende Konstellation auf, daß die im Hauptelementchemismus tholeiitischen Amphibolite eine alkalibasaltische Ti-, P- und Zr-Verteilung aufweisen. Dieser Widerspruch kann vorerst nicht gelöst werden; eine Erklärungsmöglichkeit für dieses Problem wird aber im Kapitel über die Genese ausführlich diskutiert.

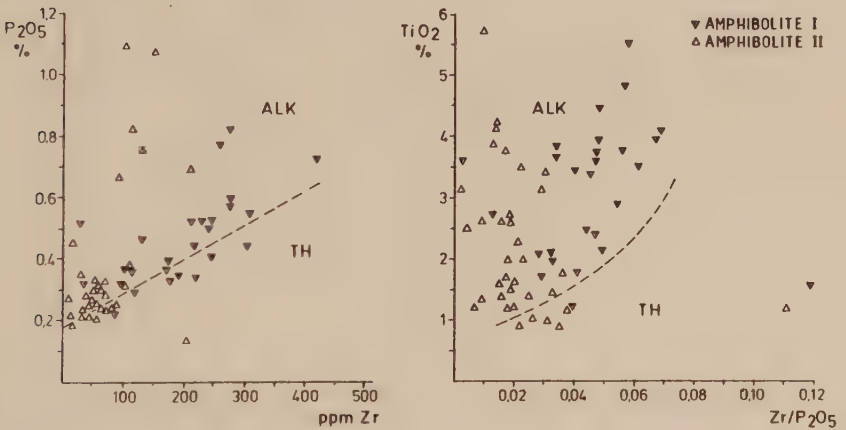


Abb. 12: Variationsdiagramm  $\text{P}_2\text{O}_5$  - Zr

Abb. 13: Variationsdiagramm  $\text{TiO}_2$  -  $\text{Zr}/\text{P}_2\text{O}_5$

Diese Diagramme von WINCHESTER & FLOYD (1976) dienen zur Unterscheidung von Alkali- und Tholeiitbasalten. ALK = alkalisch, TH = tholeiitisch. Die Mehrzahl der Amphibolite fällt ins Alkalifeld.



#### 4.6.3. Geochemische Merkmale des Amphibolitkomplexes

Ein spezielles Merkmal des Amphibolitkomplexes zeigt das  $\text{MgO-SiO}_2$ -Diagramm (Abb. 14). Die Metapyroxenite und die Talk-Anthophyllit-schiefer fallen durch eine positive Korrelation auf, die für magnesiumreiche Magmatite ungewöhnlich ist. Bei den auf der Erde be-

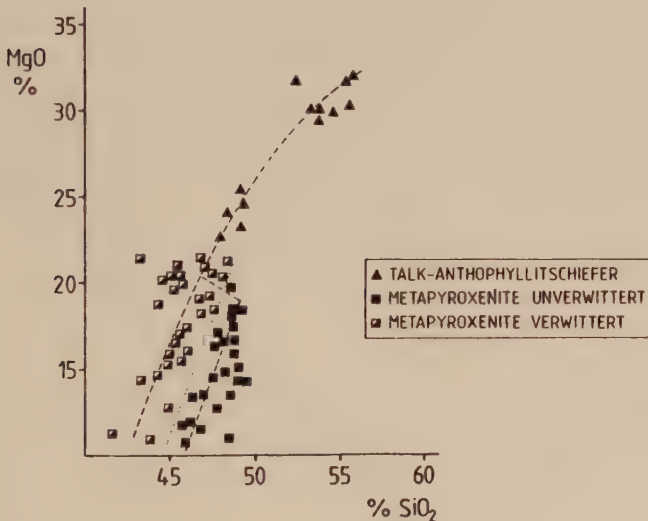


Abb. 14: Variationsdiagramm  $\text{MgO-SiO}_2$ . Die Ultramafitite des Amphibolitkomplexes weisen einen ungewöhnlichen positiven Trend auf.

kannten basisch-ultrabasischen Abfolgen ist aber die Zunahme der Basizität immer mit der Anreicherung von Olivin verbunden, die aber eine negative Korrelation hervorrufen würde. Eine metasomatisch bedingte Zufuhr von  $\text{SiO}_2$  oder Verlust an  $\text{MgO}$  kann ausgeschlossen werden, da diese Vorgänge ebenfalls eine negative  $\text{MgO-SiO}_2$ -Korrelation zur Folge hätten. Eine gleichzeitige Zunahme von  $\text{MgO}$  und  $\text{SiO}_2$  bis zu  $\text{Mg}$ -Konzentrationen von über 30 % kann also nur durch eine Zunahme der







Die basischen Proben des Metagranodiorits können direkt in die Ca-reichen Apatit-Pyroxenite übergeleitet werden. Dies spricht möglicherweise für ein gemeinsames Ausgangsmagma, das durch fraktionierende Kristallisation zu einem ultrabasischen und einem intermediären Kristall-Schmelze-Gemisch differenziert.

Eine ähnliche Situation kann auch in dem ternären Diagramm  $\text{Na}_2\text{O}$  -  $\text{CaO}$  -  $\text{K}_2\text{O}$  (Abb. 16) beobachtet werden. Die sauren Glieder des Metagranodiorits fallen deutlich in ihr entsprechendes Feld; mit zunehmender Basizität entwickelt sich ein klarer Trend zur Ca-reichen Ecke des Diagramms, die von den Apatitpyroxeniten eingenommen wird.

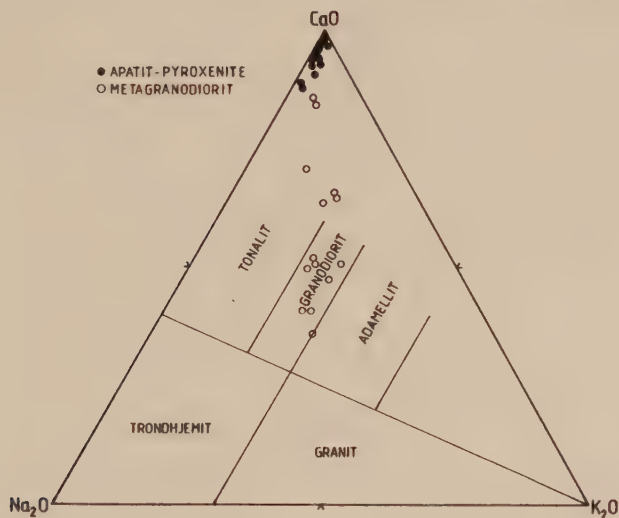


Abb. 16: Dreiecksdiagramm  $\text{Na}_2\text{O}$  -  $\text{CaO}$  -  $\text{K}_2\text{O}$ . Die regulären Proben des Metagranodiorits fallen deutlich in ihr entsprechendes Feld.



Eines der Hauptmerkmale des Amphibolitkomplexes ist die große Varianz der  $\text{TiO}_2$ -Gehalte. Die Abb. 17 zeigt, daß die Ti-Konzentrationen in Abhängigkeit vom  $\text{FeO}/\text{MgO}$ -Verhältnis eine konstante Ent-

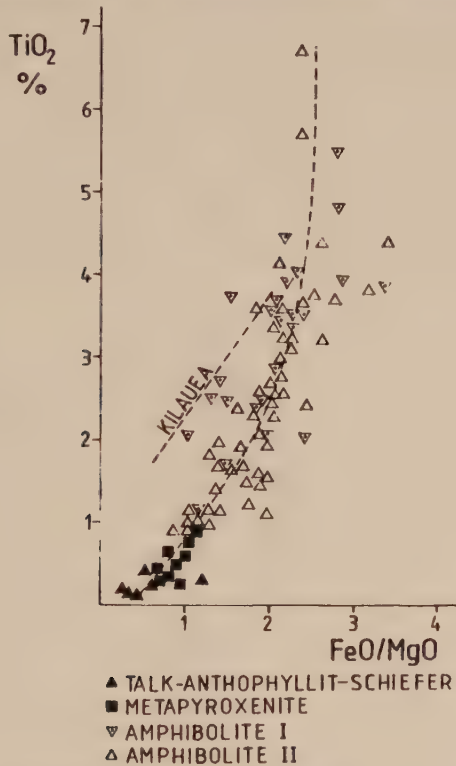


Abb. 17: Variationsdiagramm  $\text{TiO}_2$  -  $\text{FeO}/\text{MgO}$ ;  $\text{FeO}$  - Gesamteisen. Die Metavulkanite des Amphibolitkomplexes sind wesentlich Fe-reicher als die Basalte von Kilanea/Hawaii.

wicklung von den Talk-Anthophyllitschiefern bis zu den Ti-reichen Amphiboliten zeigen und deshalb ein gemeinsames Entstehungsmilieu im oberen Mantel anzunehmen ist. Vergleichbare Titangehalte, sowie ent-



sprechend steile Anstiege der Korrelationen sind auf der Erde nur im Bereich von ozeanischen Inseln wie z. B. Hawaii zu finden. Der Vergleich mit entsprechenden Basalten von Hawaii spricht für eine ähnliche Entstehungsgeschichte der Amphibolite. Die  $Ti-FeO/MgO$ -Verhältnisse lassen dagegen vermuten, daß der präkambrische obere Erdmantel im Bereich des Amphibolitkomplexes reicher an Fe gewesen sein muß als die Magmaquelle der Hawaiibasalte (Kilanea).

Der in dieser Gesteinsvergesellschaftung besonders interessante komatiitische Chemismus zeigt auch im Spurenelementbereich seine Besonderheiten. Das ternäre Zr-Ni-Yx5-Diagramm (Abb. 18) ist durch einen

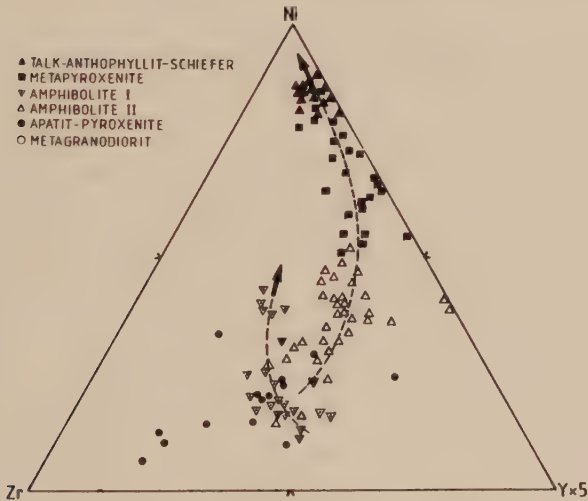


Abb. 18: Dreieckdiagramm Zr - Ni - Y x 5. Einzelne Proben des Apatit-Pyroxenites sind im Hauptelementchemismus den  $MgO$ -ärmeren Metapyroxeniten ähnlich, aber sie können anhand der Spurenelemente deutlich unterschieden werden.



Trend von den Apatitpyroxeniten bis zu Ni-reichen Metapyroxeniten und Talk-Anthophyllitschiefern charakterisiert. Die beiden Amphibolittypen weisen deutliche Gegensätze in ihrer Variation auf, was wahrscheinlich auf eine unterschiedliche Art der Genese zurückzuführen ist. Wichtiger jedoch ist die signifikante Trennung von Komatiiten und Apatit-Pyroxeniten. Letztere besitzen z. T. einen Hauptelementchemismus, der aufgrund der Mg-Gehalte und der hohen  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ -Verhältnisse als komatiitisch einzustufen wäre.

Die Ultramafitite unterscheiden sich aber von den Apatit-Pyroxeniten grundsätzlich durch wesentlich höhere Ni- (und Cr-) Gehalte, wodurch eine genetische Verwandtschaft ausgeschlossen werden kann.

#### 4.7. Die geotektonische Stellung der Amphibolite

##### 4.7.1. Einleitung

Der Chemismus basaltischer Gesteine spielt aufgrund aktualistischer Überlegungen eine wichtige Rolle bei der Rekonstruktion geologischer Zusammenhänge der erdgeschichtlichen Vergangenheit. Die Arbeiten von PEARCE und CANN (1970, 1973, 1975) waren richtungsweisend für die Identifizierung von Basalten unterschiedlicher geotektonischer Stellungen. Der Vergleich der Metabasalte des Amphibolitkomplexes mit modernen Basalten gibt möglicherweise Aufschluß über die geologische Umgebung des Amphibolitkomplexes bzw. dessen stratigraphische Stellung im nigerianischen Basement. Für die Auswahl der Elemente, die für eine Unterscheidung der einzelnen Magmatypen nützlich sein können, stellen PEARCE und CANN (1973) bestimmte Kriterien auf:

a) Ihre Variabilität zwischen den verschiedenen Magmatypen muß größer sein, als innerhalb der Proben des gleichen Typs.



- b) Sie sollten möglichst unempfindlich gegenüber sekundären Prozessen, z. B. Verwitterung und Metamorphose sein.
- c) Sie sollten leicht zu messen sein, mit einer guten Reproduzierbarkeit der Ergebnisse.

Die Elemente Ti, Zr, P und Y erfüllen diese Voraussetzungen. Weiterhin sind die Cr- und Ni-Gehalte zur Unterscheidung zwischen verschiedenen Basalttypen geeignet.

#### 4.7.2. Vergleich mit modernen Basalten

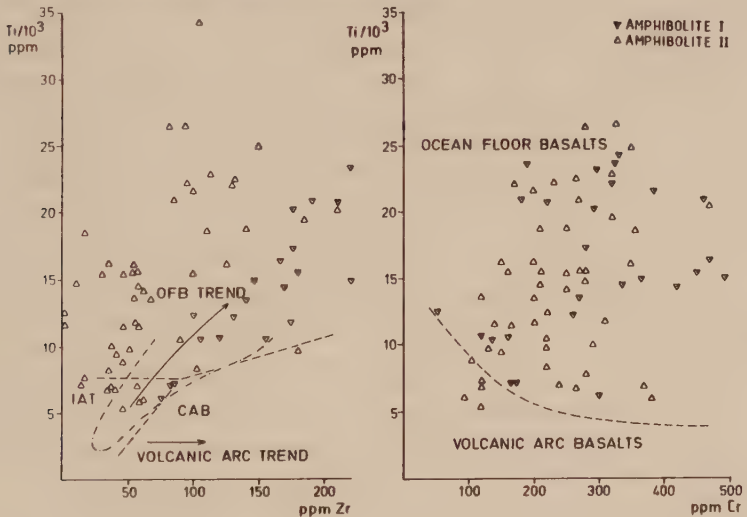


Abb. 19: Variationsdiagramm  $Ti/10^3$  - Cr

Abb. 20: Variationsdiagramm  $Ti/10^3$  - Zr

OFB = Ozeanbodenbasalte, IAT = Inselbogentholeiite, CAB = Kalkalkali-basalte. In diesen Diagrammen von GARCIA (1978) belegen die Amphibolite mit wenigen Ausnahmen das Feld der Ozeanbodenbasalte.



Die von Garcia (1978) mit Hilfe zusätzlicher Analysendaten überarbeiteten Ti-Zr- und Ti-Cr-Korrelationsdiagramme von PEARCE (1975) und PEARCE & CANN (1973) bieten die Möglichkeit, die Tholeiite von Ozeanboden und Inselbögen, sowie kalkalkalische Vulkanite zu unterscheiden.

In Korrelationsdiagramm Ti-Cr (Abb. 19) fallen die Metabasalte des Amphibolitkomplexes mit wenigen Ausnahmen in das Feld der Ozeanbodenbasalte. Das Diagramm Ti-Zr (Abb. 20) macht deutlich, daß im Bereich niedriger Titangehalte eine Trennung zwischen Inselbogens-tholeiiten(IAT) und Ozeanbodenbasalten (OFB) nicht möglich ist, da pikritische und plagioklasreiche Basalte der Ozeanböden ebenfalls nur geringe Ti-Konzentrationen aufweisen. Die Ti-Werte der Amphibolite liegen aber im allgemeinen deutlich über denen der IAT, womit die Affinität zu den Ozeanbodenbasalten erneut zum Ausdruck kommt. Im Diagramm Ti/Cr-Ni von BECCALUVA et al.(1977)(Abb.21) wird das Problem mit den niedrigen Ti-Gehalten umgangen, indem Ni als zusätzlicher Faktor eingebracht wird, so daß auch die pikritischen Basalte mit in die Untersuchung eingeschlossen werden können. Die Lageverteilung der Amphibolitproben macht klar, daß Inselbogens-tholeiite als Ausgangsgesteine von den Überlegungen ausgeschlossen werden können. Trotz der Ähnlichkeit mit Ozeanboden-Basalten (OFB) sind die z. T. hohen Titangehalte nicht mit diesem Basalttyp in Vereinbarung zu bringen. Titan über 2,5 % ist bei Ozeanbodenbasalten äußerst selten und beschränkt sich auf die Basalte ozeanischer Inseln und der Kontinente. Einen Vergleich mit den Basalten innerhalb ozeanischer und kontinentaler Platten ermöglicht ein auf Diskriminanzanalyse beruhendes Diagramm von PEARCE (1976) in dem die Funktionen



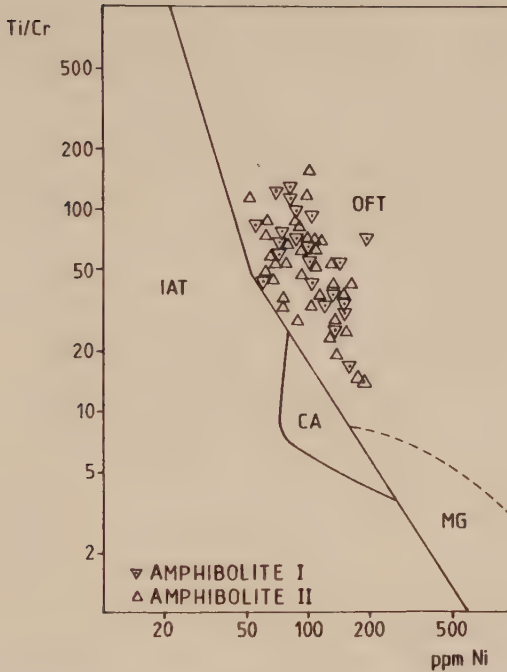


Abb. 21: Variationsdiagramm Ti/Cr - Ni (nach BONATTI, 1979).  
IAT = Inselbogentholeiite, OFT = Ozeanbodentholeiite, CA = Ca-reiche  
OFT, MG = Mg-reiche OFT. Die Amphibolite fallen eindeutig in das  
Feld der Ozeanbodentholeiite.

$F_1$  und  $F_2$  zusammen 76.1 % der Informationen enthalten, die zur Trennung der einzelnen Magmatypen zur Verfügung steht (Abb. 22). Bei der Diskriminierung von basaltischen Gesteinen ist aufgrund möglicher Verwitterungseinflüsse bei der Verwendung von Hauptelementen Vorsicht geboten. Die vorhergehenden Überlegungen haben jedoch gezeigt, daß der Chemismus der Amphibolite als unverändert angesehen werden kann. Die Anwendung dieses Diagramms auf die Meta-



basalte des Amphibolitkomplexes zeigt, daß die Amphibolite trotz einiger Ausnahmen deutlich den Intraplatten-Basalten (Within-Plate-Basalts = WPB) zuzurechnen sind.

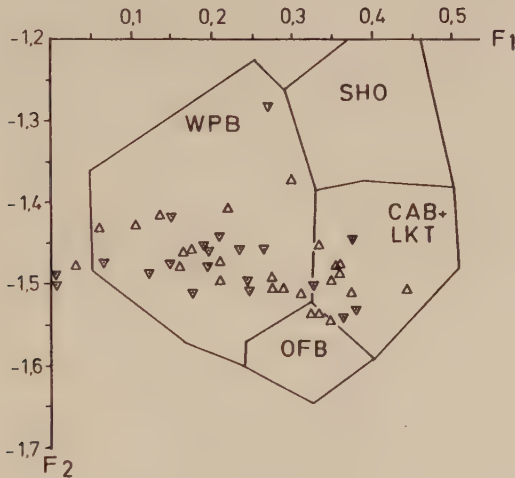


Abb. 22: Diagramm  $F_1 - F_2$  (nach PEARCE, 1979). Dieses Diagramm beruht auf der Diskriminanzanalyse der verschiedenen Basalttypen und dient zur Unterscheidung von Intraplattenbasalten (WPB), Shoshoniten (SHO), Kalkalkalibasalten (CAB), K-armen Inselbogens-tholeiiten (LKT) und Ozeanbodenbasalten. Die Diskriminanzfunktionen sind:

$$F_1 = + 0.0088 \text{ SiO}_2 - 0.0774 \text{ TiO}_2 + 0.0102 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0.0066 \text{ FeO} \\ - 0.0017 \text{ MgO} - 0.0143 \text{ CaO} - 0.0155 \text{ Na}_2\text{O} - 0.0007 \text{ K}_2\text{O}$$

$$F_2 = - 0.0130 \text{ SiO}_2 - 0.0185 \text{ TiO}_2 - 0.0129 \text{ Al}_2\text{O}_3 - 0.0134 \text{ FeO} \\ - 0.0300 \text{ MgO} - 0.0204 \text{ CaO} - 0.0481 \text{ Na}_2\text{O} + 0.0715 \text{ K}_2\text{O}$$

FeO = Gesamteisen



Das Diagramm von PEARCE (1976) ermöglicht aber keine Trennung zwischen Basalten ozeanischer Inseln und ihren kontinentalen Äquivalenten. Für diesen Zweck soll das ternäre Diagramm  $\text{TiO}_2 - \text{K}_2\text{O} - \text{P}_2\text{O}_5$  von PEARCE et al. (1974) benützt werden, das zur Unterscheidung von ozeanischen und kontinentalen Basalten dient. Verwendbar sind Analysen die im AFM-Diagramm weniger als 20 % alkalische Anteile haben. Die Abbildung 23 zeigt, daß die Ti-reichen Amphibolite

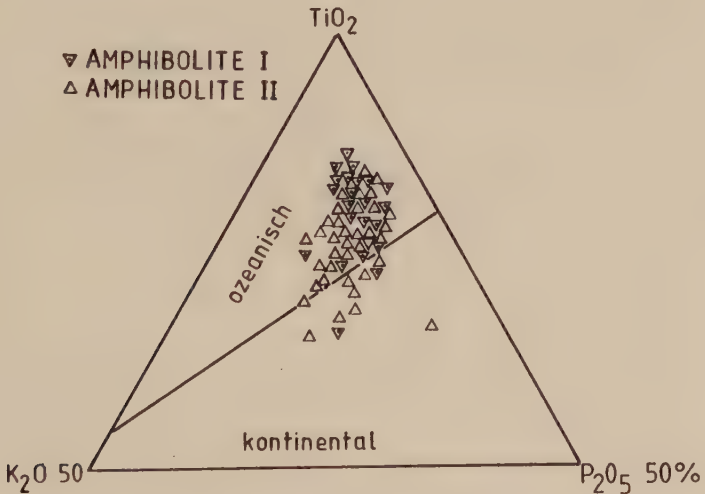


Abb. 23: Dreiecksdiagramm  $\text{K}_2\text{O} - \text{TiO}_2 - \text{P}_2\text{O}_5$  (nach PEARCE et al. 1974)  
Die Mehrzahl der Amphibolite fällt ins ozeanische Feld.

in das ozeanische Feld fallen, während die Ti-ärmeren eindeutig dem kontinentalen Milieu zuzuordnen sind. Kontinentale Tholeiite aber weisen im Vergleich zu Ozeaninseltholeiiten höhere Kaliumgehalte auf, was nach ENGEL et al. (1965) wahrscheinlich auf Kontamination von Krustenmaterial zurückzuführen ist. Die Kaliumgehalte der Am-



phibolite mit durchschnittlich 0.3 % liegen aber wesentlich unter denen der kontinentalen Tholeiite, so daß der Trend in das kontinentale Feld allein durch abnehmende Titangehalte zu erklären ist.

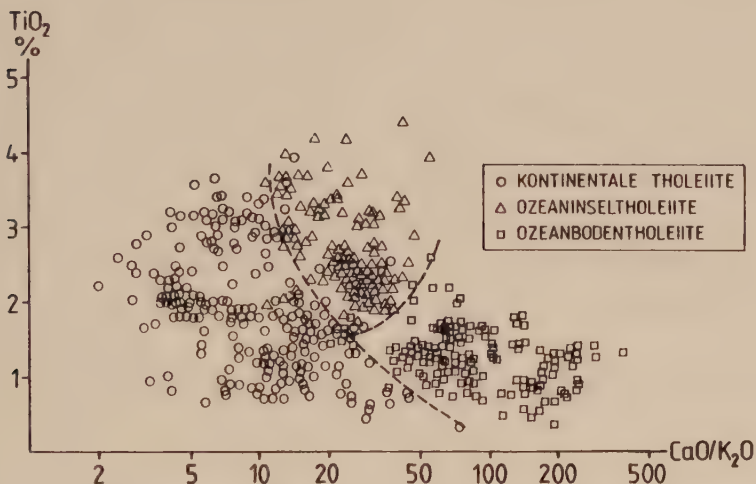


Abb. 24: Variationsdiagramm  $\text{TiO}_2$  -  $\text{CaO/K}_2\text{O}$ . Mit diesem Diagramm können die Tholeiitbasalte der Kontinente, der Ozeaninseln und des Ozeanbodens unterschieden werden. Es ist auf unverwitterte Basalte beschränkt. Die Literaturdaten stammen von folgenden Autoren: MAC DONALD (1968), MC BIRNEY & WILLIAMS (1969), IBARROLA (1969), STEPHENSON & GRIFFIN (1976), BULTITUDE (1976), BECCALUVA et al. (1977), FLOWER et al. (1977), BRYAN et al. (1977), WRIGHT et al. (1973), YEATS et al. (1973), GUNN & ROBOL (1975), ENGEL & ENGEL (1965), ENGEL & FISHER (1975), WASHINGTON (1917), SHIDO et al. (1974), GUNN et al. (1971), LE MAITRE (1962), GASS et al. (1973), MIYASHIRO et al. (1969), HART et al. (1972), COX & HORNING (1966).

Eine Zuordnung der Amphibolite zu Tholeiiten kontinentaler oder ozeanischer Abstammung ist für die geologische Stellung des Amphibolitkomplexes von großer Bedeutung. Um eine Trennung zwischen den Tholeiiten der Kontinente und ozeanischen Inseln doch noch zu ermöglichen, wurden die Daten von 225 kontinentalen Basalten und



Diabasen (CT), 125 Ozeaninselbasalten (OIT) und 150 Ozeanbodentholeiiten (OFT) in ein  $\text{TiO}_2$ - $\text{CaO/K}_2\text{O}$ -Diagramm eingetragen. Die Auswahl dieser Elemente beruht auf der Überlegung, daß die kontinentalen Tholeiite höhere  $\text{K}_2\text{O}$ -Gehalte als ihre ozeanischen Äquivalente aufweisen, die wiederum durch ihre Ti-Gehalte zu unterscheiden sind. Der tholeiitische Charakter jeder Probe wurde im  $\text{Alk-SiO}_2$ -Diagramm nach MC DONALD & KATSURA (1964) überprüft. Die Abbildung 24 zeigt, daß mit Hilfe der Elemente Ti, Ca und K die drei Basalttypen gut voneinander abgegrenzt werden können. 95,1 % der Ct, 96 % der OIT und OFT fallen in ihre entsprechenden Felder. Die Tholeiite der Inselbögen weisen ähnliche  $\text{CaO/K}_2\text{O}$ -Verhältnisse wie die Ti-armen kontinentalen Tholeiite auf und wurden deshalb in diesem Diagramm nicht berücksichtigt.

Die Metabasalte des Amphibolitkomplexes (Abb. 25) bilden in diesem

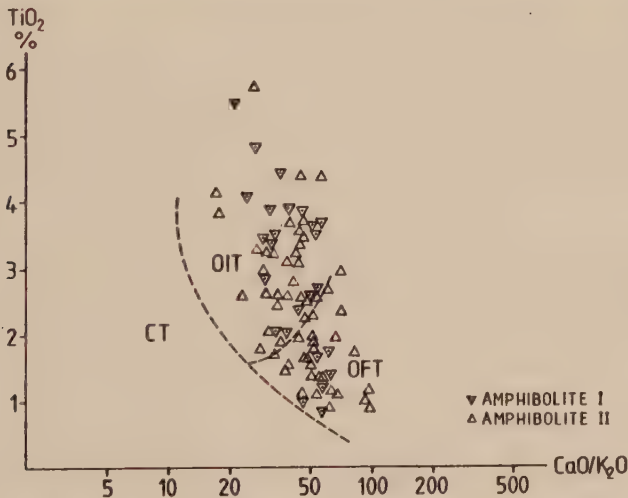


Abb. 25: Variationsdiagramm  $\text{TiO}_2$  -  $\text{CaO/K}_2\text{O}$ . CT - kontinentale Tholeiite, OIT = Ozeaninseltholeiite, OFT = Ozeanbodentholeiite. Die Amphibolite können den OIT und OFB zugeordnet werden. Die Ti-armen Proben weisen durchschnittlich höhere  $\text{CaO/K}_2\text{O}$ -Verhältnisse auf.



Diagramm einen Trend aus, der von den Ti-reichen Ozeaninseltholeiiten bis zu den K-ärmeren Ozeanbodentholeiiten verläuft. Die kontinentalen Vulkanite können nach diesem Diagramm völlig ausgeschlossen werden.

Die Tatsache, daß ein Teil der Amphibolite das Ozeanbodenfeld belegt, muß keine Zugehörigkeit zu den OFT bedeuten. Basalte mit geringen Titangehalten können Produkte eines verarmten oberen Erdmantels aber auch das Ergebnis fraktionierender Kristallisation oder erhöhter partieller Aufschmelzung darstellen. Die enge lokale Vergesellschaftung von Ti-armen und -reichen Amphiboliten spricht für eine gemeinsame Entstehungsgeschichte, so daß die Variation der Titangehalte auf die Bildungsweise des Magmas zurückzuführen ist.

#### 4.8. Der Amphibolitkomplex im Vergleich mit archaischen Grüngesteinsabfolgen

##### 4.8.1. Einleitung

Die durch mehrere Metamorphoseereignisse bedingten unterschiedlichen radiometrischen Altersdaten ergeben keine Möglichkeit die Krustenentwicklung des SW-nigerianischen Basements einem bestimmten Zeitraum der frühen Erdgeschichte zuzuordnen. Der geologische Überblick hat gezeigt, daß die metavulkano-sedimentären Abfolgen des Ife-Ilesha-Gebietes viele Gemeinsamkeiten mit den archaischen Greenstonebelts aufweisen. Die Existenz komatiitischer Gesteine in einem Gebiet präkambrischen Alters ist ein zusätzlicher Anlaß zu prüfen, ob der Amphibolitkomplex auf geochemischem Weg den archaischen Grüngesteinsabfolgen zugeordnet werden kann.



#### 4.8.2. Vergleich mit archaischen und jungen Tholeiiten

CONDIE (1976) unterteilt die archaischen Tholeiite in zwei Gruppen, die sich durch Anreicherung (EAT = enriched archean tholeiites) oder Verarmung (DAT = depleted archean tholeiites) an großionigen lithophilen Elementen unterscheiden. Die verarmten archaischen Tholeiite, zu denen auch die 'komatiitischen Tholeiite' gerechnet werden, sind der überwiegende Gesteinstyp der meisten Greenstonebelts. Tabelle 4<sup>\*</sup> zeigt, daß die archaischen Tholeiite sich von ihren jüngeren Äquivalenten im wesentlichen durch höhere Fe- und niedrigere Al-Gehalte, sowie im Spurenelementbereich durch relativ hohe Konzentrationen an Übergangsmetallen und hohen Rb/Sr-Werten (Ausnahme kontinentale Tholeiite) unterscheiden.

Anhand dieser Durchschnittsdaten können die Tholeiite des Amphibolitkomplexes am besten den archaischen Tholeiiten zugeordnet werden. Ein Vergleich mit den verarmten oder angereicherten Typen ist aufgrund der Anreicherung von Rb, Cr und Ti nicht möglich, was ebenso wie die niedrigen  $\text{SiO}_2$ -Konzentrationen, die überdurchschnittlich hohen Fe- und Ca-Gehalte, sowie die hohen  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ -Verhältnisse eine Sonderstellung des Amphibolitkomplexes herausstreicht.

#### 4.8.3 Diagramm $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3$

Eines der wesentlichen Definitionsmerkmale der Komatiite ist das hohe  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ -Verhältnis, das nach BROOKS & HART (1974) größer als 1 sein soll; äquivalente Gesteine in Kanada, Zimbabwe, Australien und z. T. in Grönland zeigen jedoch auch etwas geringere Werte. Die Metapyroxenite des Arbeitsgebietes (Abb. 26) sind im Chemismus mit den präkambrischen Komatiiten vergleichbar. Wie schon erwähnt, weisen viele der Metapyroxenite und sämtliche Talk-Anthrophyllitschiefer verwitterungsbedingte Ca-Verluste auf. Aus dem entsprechenden Diagramm

\* siehe Anhang



(Abb. 6) kann trotz der Variationen erkannt werden, daß das ursprüngliche  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ -Verhältnis der Ultramafitite zwischen 1.5 und 2.0 einzustufen ist, was dem Chemismus der Komatiite von Barberton Mountainland und Isua/Grönland entspricht.

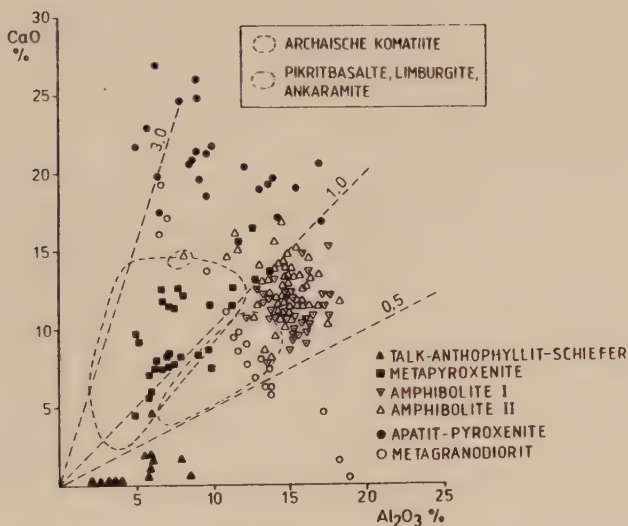


Abb. 26: Variationsdiagramm  $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3$  (nach VILJOEN & VILJOEN, 1971). Die Komatiite besitzen im Vergleich zu den jungen Pikritbasalten höhere  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ -Verhältnisse.

Mit Hilfe dieses Diagramms können analog zu VILJOEN & VILJOEN (1971) die basaltischen und peridotischen Komatiite von den im Chemismus verwandten Basalten, Pikriten und Peridotiten unterschieden werden. Die Ankaramite von Madagaskar und Hawaii, die ähnliche  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ -Verhältnisse wie die Komatiite aufweisen, unterscheiden sich von den Komatiiten durch höhere Alkali- und niedrigere  $\text{SiO}_2$ -Gehalte. Die Metatholeiite des Amphibolitkomplexes sind durch hohe Ca-Gehalte



charakterisiert; dies drückt sich auch bei den  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ -Verhältnissen aus, die mit einem Durchschnittswert von 0.83 deutlich höher liegen, als bei den Tholeiiten vom Barberton Mountain Land und Kanada (0.70).

#### 4.8.4. Diagramm $\text{CaO} - \text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3$

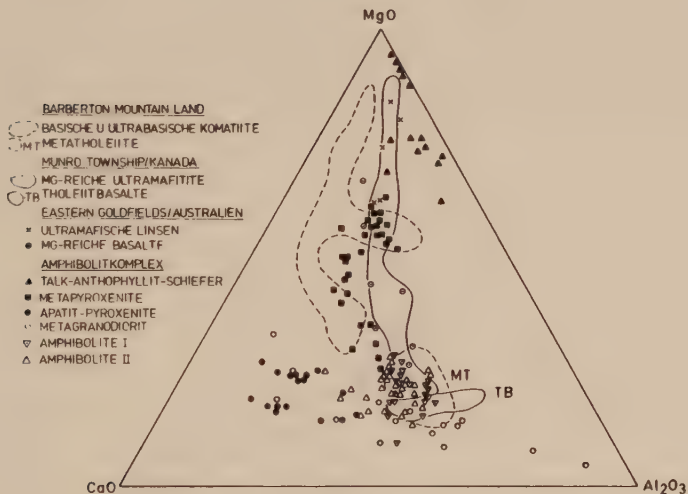


Abb. 27: Dreiecksdiagramm  $\text{CaO} - \text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ . Die Hauptgesteinstypen des Amphibolitkomplexes im Vergleich mit den archaischen Vulkaniten.

In diesem Diagramm (Abb. 27) kommt gut zum Ausdruck, daß die höheren  $\text{Ca}$ -Gehalte der südafrikanischen Komatiite einen Trend bewirken, der sich von den Trends der kanadischen und australischen Ultramafitite deutlich abhebt. Die Metapyroxenite mit dem geringsten Verwitterungseinfluß weisen einen Chemismus auf, der am ehesten mit den Komatiiten



des Barberton Mountain Landes zu vergleichen ist. Der verwitterungsbedingte, nahezu totale Ca-Verlust der Mg-reichen Talk-Anthophyllit-schiefer hat eine abrupte Verschiebung auf die Al-reiche Seite zur Folge. Der Trend der Metapyroxenite spricht jedoch dafür, daß die Mg-reichsten Schiefer im unverwitterten Zustand ebenfalls entsprechend hohe  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ -Verhältnisse aufweisen. Der früher schon angedeutete genetische Zusammenhang zwischen Apatit-Ca-Pyroxeniten und Meta-granodiorit kommt in diesem Diagramm verstärkt zum Ausdruck. Der völlig andersgeartete Trend spiegelt einen Chemismus wieder, der mit Metatholeiiten und Ultramafititen keine gemeinsame Entstehungsgeschichte zuläßt.

#### 4.8.5. Diagramm K - Rb

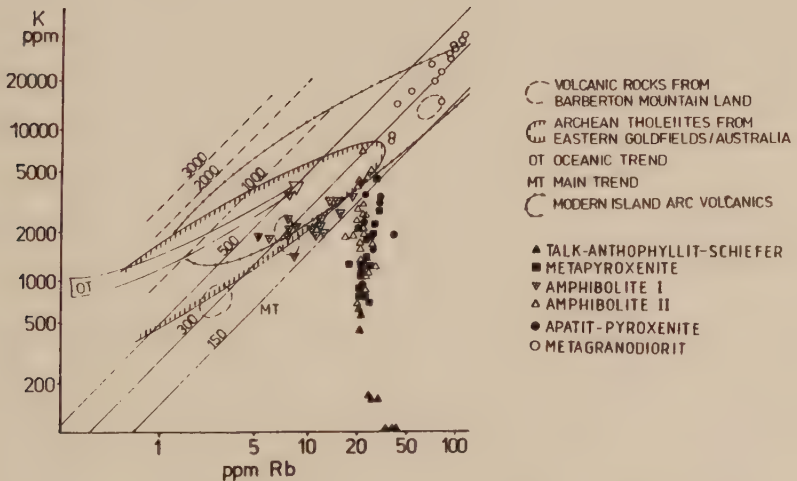


Abb. 28: Variationsdiagramm K - Rb. Die niedrigen K/Rb-Verhältnisse des Amphibolitkomplexes sprechen für ein archaisches Alter.



HART et al. (1970 b) vergleichen archaische und moderne Tholeiite anhand der K-Rb-Gehalte. Obwohl beide Elemente bei Verwitterungsprozessen zwar sehr mobil sind, kann ihr Verhältnis als weniger empfindlich betrachtet werden (CONDIE, 1976). In Abbildung 28 ist zu sehen, daß trotz der großen Überlappung die K-Rb-Verhältnisse der archaischen Tholeiite durchschnittlich niedriger sind, als bei ihren jungen Äquivalenten. Die Mehrzahl der untersuchten Magmatite weist im Vergleich zu den archaischen und modernen Vulkaniten ein deutlich niedrigeres K/Rb-Verhältnis auf. Die Zr-reichen Amphibolite I und die Metagranodioritproben zeigen K-Rb-Werte, die mit denen vom Barberton Mountain Land vergleichbar sind. Die Tatsache, daß die Zr-armen Amphibolite II, Apatit-Pyroxenite und Ultramafitite bei abnehmenden K-Gehalten ihre hohen Rb-Werte beibehalten, spricht für ein ähnlich hohes Rb-Niveau im oberen Erdmantel. Verwitterungsbedingte Rb-Anreicherungen bei den Ultramafititen sind, abgesehen von den Talk-Anthophyllitschiefern, wohl auszuschließen, da bei den Metapyroxeniten trotz unterschiedlichen Verwitterungsgrades keine Variation der Rb-Gehalte auftritt.

#### 4.8.6. $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-FeO}/(\text{FeO} + \text{MgO})$

ARNDT (1977) unterscheidet bei den Laven von Munro Township/Kanada zwischen komatiitischen Basalten ( $\text{MgO} < 12\%$ ) und Fe-reichen tholeiitischen Basalten, die mit der Komatiitabfolge assoziiert sind. Die Unterscheidungskriterien beruhen auf der Feststellung, daß die Tholeiite bei gleichen  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Gehalten ein höheres  $\text{FeO}/(\text{FeO} + \text{MgO})$ -Verhältnis aufweisen als die Komatiite. Nach ARTH et al. (1977) sind die Tholeiite mit den Komatiiten genetisch verwandt. Die Tholeiite stellen das zuerst gebildete Magma dar, während die Komatiite als Produkte weiterer Aufschmelzvorgänge zu betrachten sind. Ein



ähnliches Bild ergibt sich auch für die Basite des Amphibolitkomplexes (Abb. 29). Die titanreichen Amphibolite, die wahrscheinlich

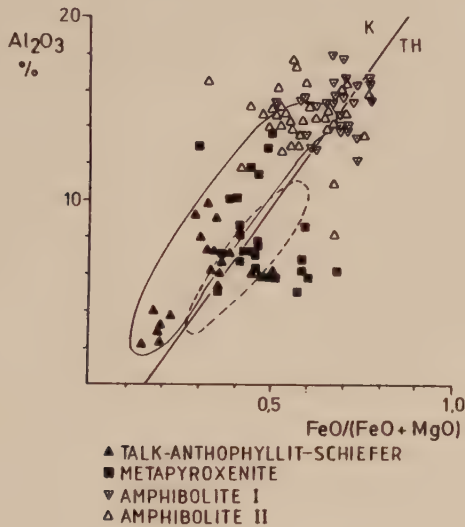


Abb. 29: Variationsdiagramm  $\text{Al}_2\text{O}_3$  -  $\text{FeO}/(\text{FeO} + \text{MgO})$  nach NALDRETT & CABRI, 1976).  $\text{FeO} \equiv$  Gesamteisen; K = komatiitisch, TH = tholeiitisch; durchgezogene Linie = Komatiite von Kanada, Zimbabwe, Australien, Indien und Finnland; gestrichelte Linie = Komatiite von Barberton Mountain Land/SA und Fiskenaesset/Grönland

als erste gebildet wurden, fallen in das Tholeiitfeld, während die titanärmeren den Komatiiten zugerechnet werden können und nach obiger Aussage das Resultat erhöhter Aufschmelzung darstellen.

Zu diesem Diagramm ist zu bemerken, daß die Unterteilung in komatiitische und tholeiitische Basalte auf das Archaikum beschränkt



ist. Die Basalte jüngerer Zeit belegen das Al-reichere Feld bei den Komatiiten, wobei aber deutlich zum Ausdruck kommt, daß die archaischen Tholeiite eisenreicher als ihre jüngeren Äquivalente waren. Die peridotitischen und pyroxenitischen Komatiite von Westaustralien, Zimbabwe, Indien und Finnland fallen wie die Laven von Munro Township in das Komatiitfeld.

Ein Teil der pyroxenitischen Komatiite des Amphibolitkomplexes befindet sich ebenso wie die entsprechenden Ultramafitite von Barberton Mountain Land und von Fikaenassat (Grönland) unterhalb der Komatiit/Tholeiit-Linie. Dies ist neben den hohen  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ -Verhältnissen ein weiteres Argument dafür, daß der Amphibolitkomplex am besten mit den älteren der archaischen Gesteinsabfolgen der Erde verglichen werden kann.

#### 4.8.7. Vergleich mit Mondgesteinen

Der spezielle Chemismus der Metatholeiite, insbesondere die niedrigen Konzentrationen an  $\text{SiO}_2$  und  $\text{Na}_2\text{O}$  und die hohen Fe- und Ti-Gehalte, erinnert sehr stark an Mondbasalte und legt einen Vergleich mit diesen nahe. Dazu wurde ein Diagramm von SAXENA et al. (1977) herangezogen, das auf den chemischen Daten von 604 Mondgesteinen und 2188 terrestrischen Magmatiten von ultrabasischer bis granitischer Zusammensetzung beruht. Die Faktorenanalyse dieser Daten ergab 12 Faktoren von denen SAXENA et al. (1977) die beiden ersten für 38 % bzw. 15 % der Varianz verantwortlich sind:

$$F_1 = 0.143 \text{ SiO}_2 + 0.059 \text{ Al}_2\text{O}_3 - 0.012 \text{ Fe}_2\text{O}_3 - 0.203 \text{ FeO} - 0.264 \text{ MgO} \\ - 0.346 \text{ CaO} + 0.933 \text{ Na}_2\text{O} + 0.206 \text{ K}_2\text{O} - 0.039 \text{ TiO}_2$$

$$F_2 = 0.151 \text{ SiO}_2 + 0.979 \text{ Al}_2\text{O}_3 - 0.033 \text{ Fe}_2\text{O}_3 - 0.112 \text{ FeO} - 0.270 \text{ MgO} \\ + 0.061 \text{ CaO} + 0.071 \text{ Na}_2\text{O} + 0.026 \text{ K}_2\text{O} - 0.157 \text{ TiO}_2$$



Wird Faktor 1 gegen Faktor 2 aufgetragen, so ergibt sich eine deutliche Trennung zwischen Erd- und Mondgesteinen. Keiner der terres-

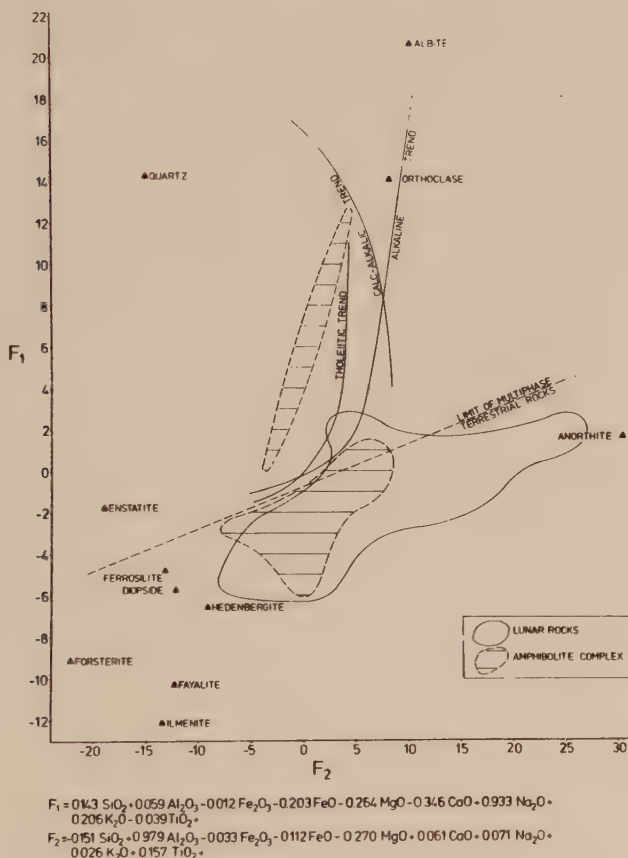


Abb. 30: Faktorendiagramm  $F_1 - F_2$ . Mit diesem Diagramm von SAXENA et al. (1977) können die lunaren Magmatite von den terrestrischen unterschieden werden. Mit Ausnahme des Metagranodiorits fallen alle Gesteinstypen des Amphibolitkomplexes in das Feld der Mondgesteine.



trischen Differentiationstrends ist für die Mondgesteine signifikant. Die Darstellung einzelner Mineralphasen zeigt abgesehen von den Extrembereichen des Diagramms, daß dessen Anwendungsmöglichkeit auf mehrphasige Gesteine beschränkt ist.

Die Variation der untersuchten Proben ergibt ein interessantes Bild (Abb. 30). Der Metagranodiorit zeigt einen durch die unregelmäßige Verteilung der mafischen Komponenten verursachten Trend im Erdfeld, der sich aber nicht mit den Tholeiiten, Alkali- und Kalkalkaligesteinen vergleichen läßt. Die Mehrzahl der Ultramafitite und Metatholeiite fällt zusammen mit den Apatit-Pyroxeniten in den Bereich der Mondgesteine.

Nach SAXENA et al.(1977) besteht der Hauptunterschied im Chemismus zwischen terrestrischen und lunaren Gesteinen darin, daß letztere arm an Albit sind und bei entsprechender Albitzugabe dem Alkalitrend terrestrischer Gesteine entsprechen würden. Eine ähnliche Überlegung könnte den Widerspruch zwischen dem tholeiitischen Hauptelementchemismus und alkalischem Neben- und Spurenelementchemismus der Amphibolite erklären. Die Konzentrationen von  $Al_2O_3$  sind jedoch zu hoch, um an eine Verarmung an Albit zu denken, so daß die niedrigen  $Na_2O$ -Gehalte wahrscheinlich auf mangelnde Jadeitanteile in den Klinopyroxenen des oberen Mantels zurückzuführen sind.

#### 4.8.8. Die geochemische Differentiation des oberen Erdmantels im Verlauf der Erdgeschichte.

Die Unterschiede im Chemismus zwischen den archaischen und jungen Gesteinen lassen vermuten, daß eine geochemische Differentiation des oberen Erdmantels im Verlauf der Erdgeschichte stattgefunden hat. Die große Ähnlichkeit der untersuchten Amphibolite mit Mondbasalten



regt die Frage an, ob der obere Erdmantel in seinem Anfangszustand eine den Edukten extraterrestrischer Materie entsprechende Zusammensetzung aufgewiesen hat.

Die bisherigen Untersuchungen zeigen, daß die archaischen Basite und Ultramafitite von ihren jüngeren Äquivalenten die hohe  $\text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg})$ - bzw. hohe  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ -Verhältnisse unterscheiden. Calcium und Aluminium sind zwei Elemente, die aufgrund ihrer geringen Volatilität relativ stabil bei Fraktionierungsprozessen sind, die bei der Entstehung von Planeten und Meteoriten angenommen werden (RINGWOOD & ESSENE, 1970). AHREN & MICHAELIS (1969) geben für Chondrite, basaltische Achondrite und Howardite  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{CaO}$ -Verhältnisse von durchschnittlich 1.2 an, während nach GREEN und RINGWOOD (1967 a) diese Verhältnisse bei den terrestrischen Basalten bei  $1.5 \pm 0.3$  liegen.

Um mögliche Entwicklungstendenzen aufzuzeigen, wurde das  $\text{FeO}/\text{MgO}$ -Verhältnis gegen das  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{CaO}$ -Verhältnis aufgetragen (Abb. 31). (Die Verwendung von Mittelwerten ist notwendig, da eine durch Unterschiede im partialen Aufschmelzen, Bildungstiefe oder durch fraktionierende Kristallisation bedingte Heterogenität basaltischer Zusammensetzungen keine vernünftige Anwendung dieser Parameter möglich machen würde.) Die Korrelation der  $\text{FeO}/\text{MgO}$ -Verhältnisse mit denen von  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{CaO}$  spricht deutlich für eine zeitlich erkennbare geochemische Differentiation des oberen Erdmantels, dessen ursprünglichste Zusammensetzung mit dem Ausgangsmaterial von Mondgesteinen und Meteoriten vergleichbar gewesen sein dürfte. Die Metabasite des Amphibolitkomplexes, für die aufgrund der vorliegenden Daten eine Einstufung in das frühe Präkambrium gefordert wird, nehmen in diesem Diagramm eine Stellung zwischen den archaischen Basalten und den Mondgesteinen bzw. Meteo-



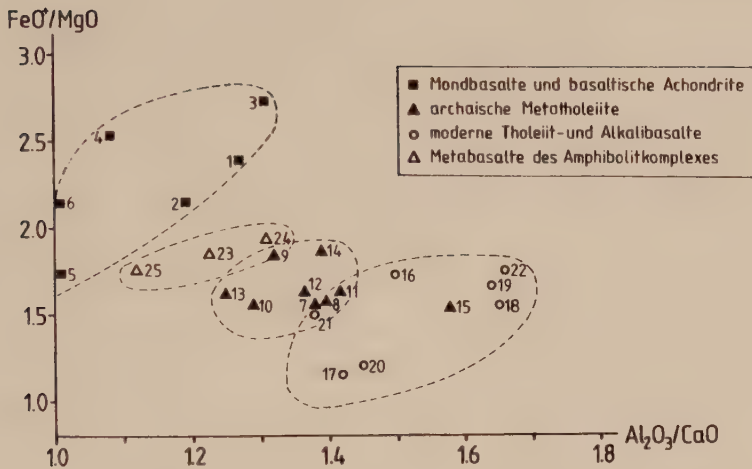


Abb. 31: Variationsdiagramm  $\text{FeO}^+/\text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3/\text{CaO}$ .  $\text{FeO}^+$  = Gesamteisen. Die Metabasalte des Amphibolitkomplexes nehmen eine Stellung zwischen den archaischen Tholeiiten und den Mondgesteinen bzw. basaltischen Achondriten ein. 1 = Achondrit (RÖSLER & LANGE, 1973), 2 = Durchschnitt basaltischer Achondrite (Urey & Craig, 1953), 3 = Basalt Luna 16, 4 = 'Diabas' Apollo 11, 5=Basalt Apollo 15 (alle RÖSLER & LANGE, 1973), 6 = Durchschnitt Apollo 11-Basalte (RINGWOOD & ESSENE, 1970), 7 = Durchschnitt archaischer Tholeiite von Westaustralien (HALLBERG, 1972), 8 = Durchschnitt archaischer Basalte von Kanada (WILSON et al., 1965), 9 = Durchschnitt archaischer Basalte von Zimbabwe (VILJOEN & VILJOEN, 1969), 10 = archaische Tholeiite, Guianaschild (CANNON, 1964), 11 = Archaische Tholeiite, Barberton/S.A. (VILJOEN & VILJOEN, 1969), 12 = Tholeiitische Amphibolite, Fiskengesset/Grönland, 13 = Metaalkaliolivinbasalte/Grönland, 14 = tholeiitische Amphibolite von Frederikshal. 15 = tholeiitische Amphibolite von Neria/Grönland (alle RIVALENTI, 1976). 16 = Durchschnitt Tholeiitbasalte, 17 = Durchschnitt abyssischer ozeanischer Tholeiite, 18=Durchschnitt Alkali-Olivin-Basalte (alle WEDEPOHL, 1974), 19 = Durchschnitt Tholeiitbasalte (MANSON, 1967), 20 = Durschnitt ozeanische Tholeiite (ENGEL et al. 1965), 21 = Durchschnitt ozeanische Tholeiite (MANSON, 1967), 22 = Durchschnitt kontinentale Basalte (MANSON, 1967), 23 = Durchschnitt Amphibolite I und II, 24 = Durchschnitt Amphibolite I, 25 = Durchschnitt Amphibolite II.

ritten ein. Dieser in Relation zu den Erdbasalten 'pimitive'Chemismus erlaubt die Folgerung, daß die untersuchten Metabasite älter als die bisher bekannten archaischen Grüngesteine sind und ihr Bildungszeitraum in den frühesten Beginn der Erdgeschichte einzustufen ist.



#### 4.9. Die Genese des Amphibolitkomplexes

##### 4.9.1. Einleitung

Im Verlauf der Erdgeschichte wurden große Mengen basaltischen Magmas gebildet. Als Ausgangsmaterial für diese Schmelzen kommt nach YODER (1976) sehr wahrscheinlich Granat-Peridotit in Betracht, wobei die Zusammensetzung des basaltischen Magmas von der Tiefenlage der partiellen Aufschmelzung, vom Betrag und Proportion der flüchtigen Bestandteile und anderen Faktoren abhängig ist. Im allgemeinen werden bei hohen Drucken und einer  $\text{CO}_2$ -reichen Gasphase Alkalibasalte gebildet, während die tholeiitischen Magmen bei niedrigen Drucken und hohen  $\text{H}_2\text{O}$ -Anteilen entstehen. Im Gegensatz zu den Hauptelementen ist der Erdmantel an Neben- und Spurenelementen nicht gesättigt. Die Tholeiitbasalte der unterschiedlichen geotektonischen Positionen sind im Hauptelementchemismus nahezu identisch, aber sie können aufgrund ihrer Neben- und Spurenelementgehalte weitgehend voneinander unterschieden werden. Für die Variation dieser Elemente könnten neben der Bildungstiefe der Grad der Aufschmelzung, sowie die Gegenwart von verschiedenen untergeordneten Mineralphasen verantwortlich sein (YODER, 1976).

Mit Hilfe der Elementvariation von Ti, P, Zr, Y, Ni und Cr soll versucht werden, eine Aussage über die Bildungsbedingungen des Amphibolitkomplexes zu treffen und mögliche genetische Zusammenhänge der einzelnen Magmentypen zu klären.

##### 4.9.2. $\text{TiO}_2$ - $\text{P}_2\text{O}_5$

CHAZEN & VOGEL (1974) benützen die Verteilung von Titan und Phosphor um die Genese von ozeanischen Basalten zu erklären. Ihr Modell beruht auf der Existenz von Ti- und P-Mineralen als primäre Mantelkomponenten, den Einbezug volumetrischer Betrachtungen für die Be-



urteilung der Stabilität dieser Phasen, sowie auf die Existenz von Wasser als  $\text{OH}^-$  im Erdmantel. Anhand einer Statistik über die Häufigkeitsverteilung zeigen CHAZEN & VOGEL folgende Verhaltenskriterien für Titan und Phosphor auf:

Die Konzentration von Titan und/oder Phosphor ist abhängig (in Reihenfolge der Wichtigkeit) von dem Gehalt von Wasser in der ursprünglichen Schmelze, dem Grad der Fraktionierung von Silikatphasen und der Entstehungstiefe.

Das Verhältnis  $\text{TiO}_2/\text{P}_2\text{O}_5$  weist eine signifikante negative Korrelation mit dem Druck auf, d. h. das Elementverhältnis nimmt bei zunehmender Tiefenlage des partialen Aufschmelzens ab, falls Ti und P nicht schon durch frühere Schmelzvorgänge im Erdmantel verarmt sind. Die Fraktionierung von Silikatphasen hat keinen Einfluß auf das Ti/P-Verhältnis. Wenn fraktionierende Kristallisation ein wichtiger Prozess bei der Basaltgenese ist, dann sollten  $\text{TiO}_2$  und  $\text{P}_2\text{O}_5$  eine gute positive Korrelation zeigen. Bei überwiegendem Einfluß von partialem Schmelzen ergibt sich nach CHAZEN & VOGEL (1974) ein niedriger Korrelationskoeffizient bei geringer Varianz von Ti und P.

Die Anwendung dieser Kriterien zur Klärung der Genese des Amphibolitkomplexes soll anhand des Korrelationsdiagramms  $\text{TiO}_2\text{-P}_2\text{O}_5$  besprochen werden (Abb. 32).

Die Variation von Ti und P spaltet den Amphibolitkomplex deutlich in zwei Gruppen auf:

- a. Ca-Pyroxenit und Granodiorit
- b. Metabasalte und Ultramafitite

a. Ca-Pyroxenit und Granodiorit weisen im Vergleich zu den übrigen Gesteinsserien grundsätzlich verschiedene Titan- und Phosphorgehalte auf und können genetisch gesehen vollkommen abgetrennt werden. Das



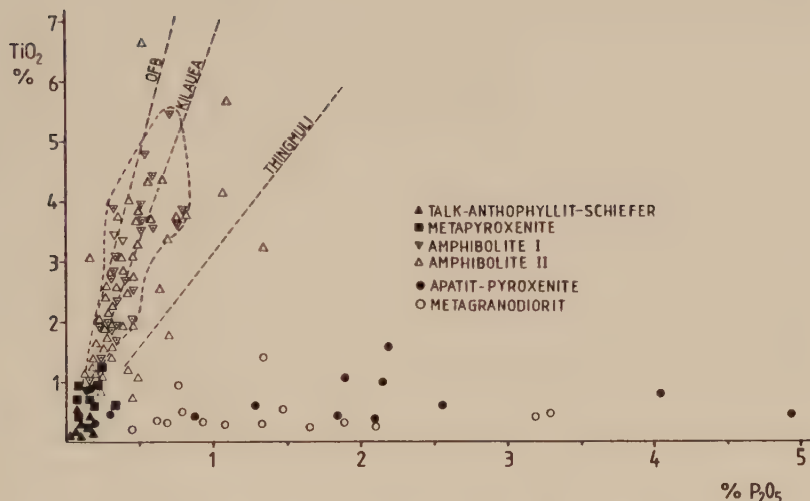


Abb. 32: Variationsdiagramm  $\text{TiO}_2$  -  $\text{P}_2\text{O}_5$ . Bei zunehmender Entstehungstiefe des Magmas nimmt das  $\text{Ti}/\text{P}$ -Verhältnis ab. Die abgebildeten Trends für Ozeanbodenbasalte (OFB), Kilauea (Hawaii), Thingmuli (Island) nach CHAZEN & VOGEL (1974) stellen nur das  $\text{Ti}/\text{P}$ -Verhältnis, aber keine Absolutwerte dar.

extrem niedrige  $\text{Ti}/\text{P}$ -Verhältnis deutet nach dem Modell von CHAZEN & VOGEL (1974) auf eine große Entstehungstiefe des Magmas hin. Beide Gesteinstypen besitzen nahezu identische  $\text{TiO}_2/\text{P}_2\text{O}_5$ -Werte, was ein gemeinsames Ausgangsmagma wahrscheinlich macht. Der enge geochemische Zusammenhang wurde schon im Diagramm  $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3$  (Abb. 26) hervorgehoben. Die gut ausgebildete Korrelation läßt auf einen großen Einfluß der fraktionierenden Kristallisation bei der Bildung dieser Magmengruppe schließen.

b. Die Metabasalte und Ultramafitite zeigen  $\text{TiO}_2/\text{P}_2\text{O}_5$ -Verhältnisse die auf einen Bildungsort mittlerer Tiefe, vergleichbar mit den



Tholeiiten von Hawaii, schließen lassen. Als Anhaltspunkt dienen die Durchschnittswerte der oberflächennah gebildeten Ozeanrückenbasalte, sowie der isländischen Tholeiite. Letztere deuten durch das Titan/Phosphor-Verhältnis einen im Vergleich zu Hawaii tieferen Entstehungsort an, was durch geophysikalische Messungen bestätigt wurde (CHAZEN & VOGEL, 1974).

Aus Abb. 32 ist ersichtlich, daß das Korrelationsverhalten innerhalb dieser Gruppe nicht einheitlich ist. Die verhältnismäßig geringe Streubreite der Amphibolite I spricht für einen größeren Einfluß von fraktionierender Kristallisation. Partielles Schmelzen dagegen dürfte auf Grund der größeren Streuung der entscheidende Prozess bei der Bildung der den Amphiboliten II entsprechenden Basalten gewesen sein. Das gleiche gilt für die Ultramafitite, deren große Variation im Abbildungsmaßstab nicht so deutlich wird. Ein Teil der Metabasalte ist durch hohe Titangehalte charakterisiert, was nach dem obigen Modell auf höhere Wassergehalte im Mantel schließen läßt. Im Widerspruch zu diesem Modell stehen die großen Unterschiede in den Titangehalten bei beiden Basaltgruppen. Nach CHAZEN & VOGEL (1974) weisen Titan und Phosphor in Magmatiten, die allein durch partielle Aufschmelzung entstanden sind, eine geringe Varianz auf. Das bedeutet, daß die bisherigen Überlegungen zur Klärung der Magmagenese nicht ausreichend sind.

#### 4.9.3. Ti - Zr - Y

Eine weitere Möglichkeit zur Diskussion der Magmagenese bieten PEARCE & NORRIS (1979) anhand von petrogenetischen Überlegungen über die Variation von Ti, Zr, Y und Nb in vulkanischen Gesteinen. Diese Elemente sind aufgrund ihrer hohen Feldstärke (= Ladung/Radius - Verhältnis) nahezu unempfindlich in Bezug auf metasomatische Alterationseffekte und deshalb besonders für die Untersuchung metamorpher oder



verwitterter Basalte geeignet.

PEARCE & NORRY (1979) benützen Daten von experimentellen Untersuchungen, koexistierender Phasen in Ultramafititen und Einsprengling/Matrix-Paaren in Vulkaniten, um eine Tabelle der Mineral/Schmelze-Verteilungskoeffizienten für Ti, Zr, Y und Nb für basische, intermediäre und saure Schmelzen zusammenzustellen. Diese Untersuchungen der genannten Autoren dienen zur Interpretation der Variation dieser Elemente einerseits innerhalb der Basalttypen und zum anderen während der fraktionierenden Kristallisation von basischen zu sauren Magmen.

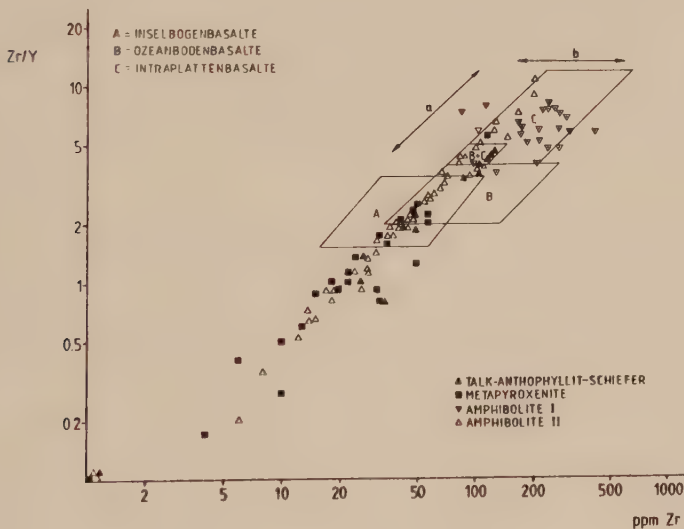


Abb. 33: Variationsdiagramm Zr/Y - Zr nach PEARCE & NORRY (1979). Die Verteilung der Amphibolite I spiegelt die im Vergleich zu den anderen Gesteinsgruppen unterschiedliche Art der Genese wieder. Erläuterungen der Vektoren a und b im Text.



Das Diagramm Zr/Y - Zr von PEARCE & NORRIS (1979) bietet eine informative Möglichkeit zur Unterscheidung von Basalten verschiedener geotektonischer Positionen. Die als anomal bezeichneten Vulkanite von Island, Afar und z. T. der britischen tertiären Provinz sind hier nicht berücksichtigt.

Um mögliche genetische Beziehungen zwischen Metabasiten und Ultramafititen zu klären, wurden letztere ebenfalls in diesem Diagramm berücksichtigt (Abb. 33).

Die Variation der Metabasite ergibt eine überraschende Konstellation:

1. Die Zr-armen Amphibolite II zeigen eine strenge positive Korrelation (Vektor a), die sämtliche Felder der Basalte von Inselbögen, mittelozeanischen Rücken und des Platteninneren durchläuft und bis zu extrem niedrigen Zr/Y-Verhältnissen verfolgbar ist.
2. Die Mehrzahl der Ultramafitite schließt sich dieser Korrelation an. Auffällig sind die hohen Zr-Gehalte der MgO- und SiO<sub>2</sub>-reichen Talkschiefer.
3. Die Rb-armen Basalte bilden ein überwiegend horizontal ausgerichtetes Feld (Vektor b) im Bereich der Basalte des Platteninneren (Within Plate Basalts). Die bei einem Teil der Ultramafitite auftretende Streuung beruht auf logarithmischem Maßstab und kann vernachlässigt werden. Zur Klärung der Zr/Y - Zr Variationen sollen die von PEARCE & NORRIS (1979) mit Hilfe der Verteilungskoeffizienten (berechnet für ca. 50 % SiO<sub>2</sub>-Gehalt) erarbeiteten petrogenetischen Modelle verwendet werden (Abb. 34).

- a) Equilibrium-Partialschmelzen
- b) Progressives Partialschmelzen;
- c) Heterogenität des Erdmantels;
- d) Fraktionierende Kristallisation in offenen oder geschlossenen Systemen.



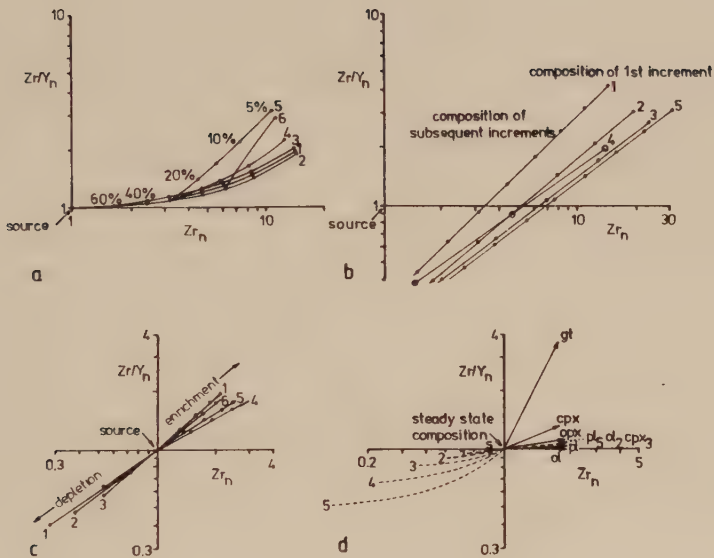


Abb. 34 a - d: Petrogenetische Modelle von PEARCE & NORRY (1979) über den Einfluß verschiedener genetischer Prozesse auf das  $Zr/Y$ -Verhältnis und die  $Zr$ -Konzentrationen (Details der einzelnen Trends, sowie der Berechnungsmodus siehe PEARCE & NORRY, 1979). a = Equilibrium-Partialaufschmelzungstrends mit prozentualer Kennzeichnung der Schmelzanteile; b = Trend bei progressivem Aufschmelzen; die Punkte auf jedem Trend stellen die Zusammensetzung der aufeinander folgenden Schmelzbeträge einer einzelnen Magmaquelle dar. c = Die Trends zur Darstellung von der Magmaquelle, wenn einzelne Schmelzbeträge dazugefügt (enrichment) oder entfernt werden (depletion). d = Trends der fraktionierenden Kristallisation in geschlossenen (Quadrant rechts oben) und offenen Systemen. In allen Diagrammen bedeutet das Suffix  $n$  daß alle Konzentrationen auf eine einheitliche Magmaquellenzusammensetzung bezogen sind. (PEARCE & NORRY, 1979)



zu a: Die Abb. 34 a zeigt, daß der Grad der Partialaufschmelzung nur den Zr-Gehalt, aber nicht das Zr/Y-Verhältnis signifikant beeinflusst, wenigstens solange Granat keine Residualphase ist.

zu b: Diese Art der Partialaufschmelzung wird als progressiver Prozess betrachtet, bei dem die abgetrennte Schmelze sich aus einer Folge kleinerer Schmelzbeiträge zusammensetzt. Aus Abb. 34 b ist ersichtlich, daß dieser Prozess das Zr/Y-Verhältnis effektiver als einmaliges Partialaufschmelzen beeinflussen würde, und daß die Stärke der Fraktionierung umgekehrt proportional zur Größenordnung der einzelnen Schmelzbeiträge ist.

zu c: Heterogenitäten im Erdmantel (Abb. 34 c) könnten nach PEARCE & NORRY (1979) dadurch entstehen, daß eine Schmelze von ihrer unmittelbaren Quelle extrahiert wird, aber nicht aus dem Erdmantel entkommt, was zu lokalen Anreicherungen von inkompatiblen Elementen führen kann. Andererseits wird auch der Einfluß einer  $H_2O/CO_2/Cl/F$ -haltigen fluiden Phase als Ursache für Heterogenitäten des Ausgangsmagmas nicht ausgeschlossen.

zu d: Die Abb. 34 d zeigt, daß eine fraktionierende Kristallisation in einem offenen System das Zr/Y-Verhältnis nur unerheblich stärker fraktioniert, als in einem geschlossenen System, ausgenommen Granat wäre eine wichtige kristallisierende Phase.

#### Vektor a:

Die Abbildungen a, b, c, d zeigen, daß alle die beschriebenen petrogenetischen Modelle eine Möglichkeit bieten, den Vektor a in Abb. 33 zu erklären. Deshalb ist es notwendig, das Verhalten anderer Spurenelemente zu berücksichtigen. Ist fraktionierende Kristallisation mit Granat als wichtige kristallisierende Phase für die Produktion der sekundären Basite verantwortlich, dann müßte der Cr-Gehalt rasch von



niedrigen zu hohen Zr/Y-Verhältnissen abnehmen. Cr bleibt aber mehr oder weniger konstant (ohne Abb.), so daß dieser Prozess nicht in Frage kommt. Dies wird durch das Fehlen einer positiven Ti-Zr-Korrelation (Abb. 35) bestätigt, die bei dem Einfluß fraktionierender Kristallisation zu erwarten wäre.

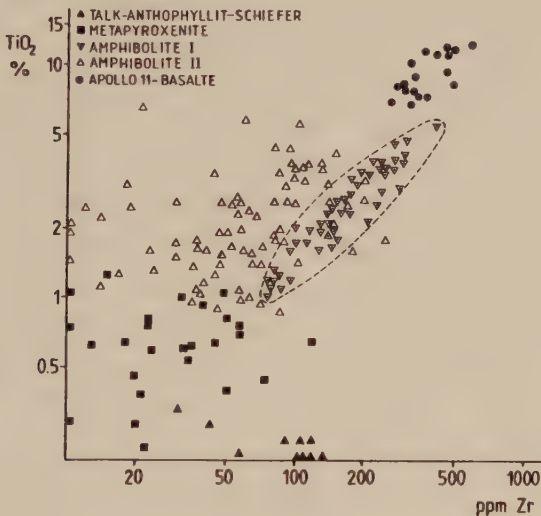


Abb. 35: Variationsdiagramm  $\text{TiO}_2$  - Zr. Der Einfluß der fraktionierenden Kristallisation bewirkt eine positive Korrelation bei den Amphiboliten I.

Variationen im Aufschmelzungsgrad einer Granat-Lherzolitquelle im Gleichgewicht mit der Schmelze erscheinen unwahrscheinlich, da die Fraktionierung des Zr/Y-Verhältnisses (von ca. 10 bis 0,2) zu weitläufig ist, um durch ein Gleichgewichtspartialschmelzen erreicht werden zu können. Gegen diesen Prozess spricht nach ARNDT (1977) auch die Tatsache, daß bei einem Aufschmelzungsgrad von mehr als



30 % die Schmelze sehr wahrscheinlich nicht mehr im Kontakt mit dem Residium bleiben würde und deshalb ein für die Bildung peridotitischen Magmas benötigter Aufschmelzungsgrad von mehr als 50 % nicht zustande kommen kann. Ein weiteres Argument gegen ein einfaches Equilibrium-Partialschmelzen ist die große Tiefenlage, die sogar eine relativ MgO-arme peridotitische Schmelze benötigt, um mit Olivin, Pyroxen und Granat im Gleichgewicht zu sein (ARNDT, 1977). Nach CAWTHORN (1975) ist es unwahrscheinlich, daß Magmen aus so großen Tiefen (180 km) die Oberfläche erreichen würden ohne durch Abkühlung und Olivinkristallisation ihren primitiven Charakter zu verlieren.

Die verbleibenden petrogenetischen Modelle, nämlich progressives Partialschmelzen und Heterogenität des Mantels, werden hier als beste Erklärung für die Genese des Amphibolitkomplexes angenommen. Progressives Schmelzen mit der zu erwartenden Mischung der einzelnen Schmelzbeträge wäre ein gut möglicher Mechanismus, um die große Variation der Zr/Y-Verhältnisse der Amphibolite II als auch der Ultramafitite herbeizuführen. Während dieser progressiven oder sequentiellen Aufschmelzung verändert sich nach ARNDT (1977) der Chemismus aufgrund der Mischung von basischen und ultrabasischen Schmelzanteilen langsam von basisch nach ultrabasisch, so daß sich auch bei geringen Schmelzbeträgen Ultramafitite bilden können. Mit Hilfe dieses Prozesses kann ebenfalls das ungewöhnlich große Spektrum der Titankonzentrationen erklärt werden.

PEARCE & NORRY (1979) führen die Unterschiede im Zr/Y-Verhältnis zwischen Ozeanbodenbasalten und Basalten des Platteninneren auf langlebige Mantelheterogenitäten zurück.

Die hohen Titan- und Zirkoniumgehalte der ersten Aufschmelzprodukte sprechen für einen angereicherten Mantel. Ein Anreicherungsprozess ist jedoch nur notwendig, wenn von Verhältnissen ausgegangen wird,



die dem Differentiationsstatus des heutigen oberen Erdmantels entsprechen. Der im Abschnitt Übe. die geochemische Differentiation des Erdmantels gezogene Vergleich zwischen terrestrischer und extra-terrestrischer Materie hat gezeigt, daß die Basite des Amphibolitkomplexes hier eine Zwischenstellung einnehmen. Die erhöhten  $\text{FeO/MgO}$ - sowie die niedrigeren  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{CaO}$ -Verhältnisse müssen also nicht das Ergebnis eines Anreicherungs Vorganges sein, sondern sie reflektieren wahrscheinlich den Chemismus eines früharchaischen Erdmantels, der an Fe-reichem Klinopyroxen noch nicht verarmt war.

#### Vektor b

Die Zr-reicheren Amphibolite I (Abb. 33) zeigen die größte Variation parallel Vektor b. Anhand der besprochenen petrogenetischen Modelle (Abb. 34 a - d) könnte diese Elementverteilung durch fraktionierende Kristallisation erklärt werden, wie es von PEARCE & NORRY (1979) für entsprechende Variationen innerhalb einer vulkanischen Abfolge interpretiert wurde. Die deutlich positive Korrelation im  $\text{TiO}_2$ -Zr-Diagramm unterstützt diese Annahme, doch die nur aufgrund des logarithmischen Maßstabes relativ geringe Variation parallel Vektor a kann nicht Übergangen werden. Dies soll mit Hilfe des Diagramms Zr-Cr (Abb. 36) diskutiert werden:

Chrom wird wie Nickel ausschließlich in mafische Phasen eingebaut. Bei partieller Aufschmelzung sollte Cr im Verhältnis zu Zr nur wenig Variation zeigen, während bei fraktionierender Kristallisation eine Zunahme von Zirkonium durch abnehmende Cr-Gehalte charakterisiert wird. Die Abb. zeigt bei den Amphiboliten II die richtungslose Verteilung, wie sie bei der Entstehung durch partielles Schmelzen erwartet wird.



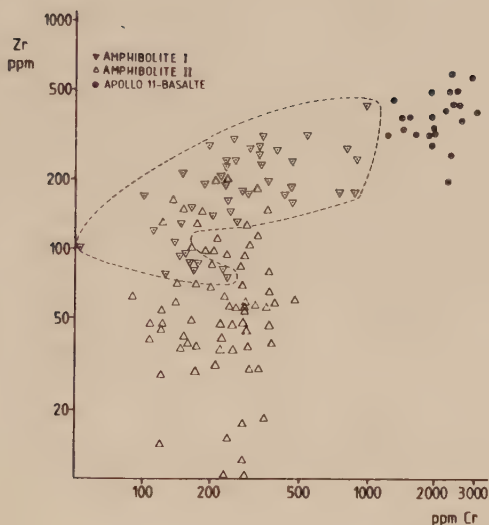


Abb. 36: Variationsdiagramm Zr - Cr. Die Amphibolite I weisen eine ungewöhnliche Verteilung von Zr und Cr auf.

Die Amphibolite I dagegen weisen eine ungewöhnliche Chrom-Zirkonium-Variation auf. Der Einfluß fraktionierender Kristallisation kann nur bei den Zr- bzw. Cr-armen Proben erkannt werden, während der Rest des Feldes trotz großer Streuung einen schwach positiven Trend aufzeigt, der in die Cr- und Zr-reichen Apollo 11-Basalte übergeleitet werden kann. Diese Konstellation ist weder durch fraktionierende Kristallisation noch durch partiales Aufschmelzen allein zu erklären. Eine Kombination dieser beiden Vorgänge könnte jedoch, wie im nachfolgenden Modell geschrieben, die Ursache für die Bildung der primären Basite darstellen (Abb. 37 a):



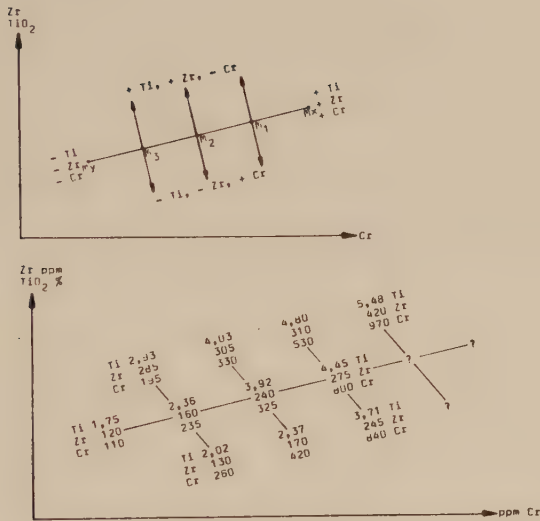


Abb. 37 a: Modellvorstellung zur Erklärung der Variationen von TiO<sub>2</sub>, Zr und Cr bei den Amphiboliten I.  $M_x$  = erster Magmaschub,  $M_y$  = zweiter Magmaschub,  $M_1 - 3$  - Mischungsvarianten von  $M_x$  und  $M_y$ , die beim Aufstieg fraktionierender Kristallisation ausgesetzt sind.

Abb. 37 b: Test des obigen Modells anhand der TiO<sub>2</sub>-Zr und Cr-Gehalte der Amphibolite I.

1. Ähnlich den Bildungsbedingungen der Apollo 11-Basalte wird durch einen geringen Grad partialer Aufschmelzung ein Cr-, Zr- und Ti-reiches Magma mit der Zusammensetzung  $M_x$  gebildet. Nach ARNDT (1977) verbleibt im Anfangsstadium des Schmelzvorganges ein Großteil des gebildeten Magmas innerhalb des Manteldiapirs, was auf die hohe Viskosität der Schmelze und dichte Packung der Kristalle zurückzuführen ist.



2. Ein nächster Schmelzschub mit einem erhöhten Grad von partialer Aufschmelzung erzeugt ein Magma, das mit den Zr-ärmeren-Amphiboliten II vergleichbar wäre ( $M_y$ ).

3. Der erhöhte Aufschmelzungsgrad ermöglicht, daß beide Magmentypen aus dem Manteldiapir entkommen und sich in unterschiedlichen Anteilen vermengen, was in Abb. 37 a durch die hypothetischen Mischpunkte  $M_1$ ,  $M_2$  und  $M_3$  dargestellt wird.

4. Durch fraktionierende Kristallisation wird aus jeder Mischungsvariante einerseits ein Ti- und Zr-reicher aber Cr-ärmer und andererseits ein Cr-reicher aber Ti- und Zr-ärmerer Magmentyp gebildet.

Dieses Modell wurde anhand der Titan-, Zirkonium- und Chromgehalte getestet. Die Abb. 37 b zeigt deutlich, daß anhand der Verteilung dieser Elemente die oben ausgeführten Überlegungen fast vollständig nachvollzogen werden können. Die Variationen von Cr, Ti und Zr entsprechen sowohl der hypothetischen Mischreihe als auch den durch fraktionierende Kristallisation bedingten sekundären Trends, so daß der Chemismus der Amphibolite I sehr wahrscheinlich auf die genannten Bildungsmechanismen zurückzuführen ist.

#### 4.9.4. Y - Zr

Das Variationsdiagramm Y - Zr (Abb. 38 a,b) bestätigt die bisher gewonnenen Erkenntnisse. Die von PEARCE & NORRIS (1979) berechneten Mineralvektoren zeigen, daß in basischen Magmen bei Kristallisation der meisten Mineralphasen eine an Y und Zr angereicherte Schmelze zurückbleibt. In intermediären und sauren Magmen würde bei der Bildung von Amphibol und (in geringerem Ausmaß) Klinopyroxen die Schmelze an Yttrium verarmen, während sich Zirkonium weiter anreichern würde. Diese Aussagen sind durch die in der Natur zu beobachtenden Trends bestätigt.



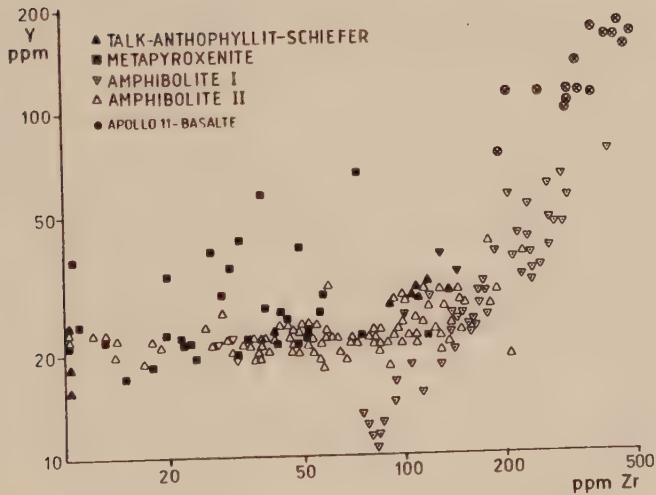
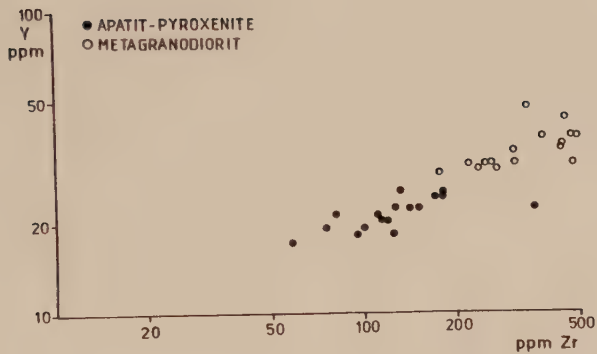


Abb. 38 a und b: Variationsdiagramme Y - Zr. Die Amphibolite I, Die Apatitpyroxenite und die Metagranodioritproben weisen eine durch fraktionierende Kristallisation hervorgerufene positive Korrelation auf.



Bei den hier untersuchten Proben zeigen der Apatit-Pyroxenit und der Metagranodiorit deutlich den Einfluß von fraktionierter Kristallisation. Der gemeinsame Trend spricht für ein einheitliches basaltisches Ausgangsmagma, das sich aufgrund der Ti/P-Verhältnisse wohl in größerer Tiefe gebildet hat und beim Aufstieg einem Fraktionierungs- und Trennungsprozess unterzogen worden ist.

Die Variation der Metabasite und Ultramafitite spiegelt die Unterschiede in der Entstehungsweise wieder: Die unter dem Einfluß von fraktionierter Kristallisation gebildeten älteren Metabasite zeigen die erwartete positive Korrelation; dagegen drückt sich die durch partielles Aufschmelzen geprägte Genese der Amphibolite II durch eine horizontale Verteilung aus.

Die Ultramafitite verhalten sich ähnlich, aber sie besitzen zum Teil höhere Y-Konzentrationen.

Klinopyroxen ist neben Granat und Amphibol die einzige Phase, die eine größere Menge Yttrium einbauen kann; Amphibol als kristallisierende Phase ist in intermediären bis sauren Magmen von größerer Bedeutung, kann aber als Bestandteil des Erdmantels vernachlässigt werden, Granat kommt als Yttriumspender ebenfalls nicht in Frage, da die Y-reichen Proben im unverwitterten Zustand hohe  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ -Verhältnisse aufweisen. Die z. T. hohen Y-Gehalte der Metapyroxenite sind daher sehr wahrscheinlich auf einen erhöhten Klinopyroxenanteil in der Schmelze zurückzuführen. Der Einbau von Yttrium in Klinopyroxen dürfte auch für den relativ geringen Anstieg der positiven Korrelation bei den Apatit-Pyroxeniten und dem Metagranodiorit verantwortlich sein, deren Chemismus durch Pyroxenakkumulate geprägt ist. Die Variation der Ultramafitite in den Diagrammen Y - Zr (Abb. 38) und  $\text{TiO}_2$  - Zr (Abb. 35) ist für die Definition des komatiitischen Chemismus von großer Bedeutung:



Die Magnesium-reichen pikritischen Laven in modernen Basaltassoziationen entstehen durch akkumulative Anreicherung von Olivin, was sich in einer positiven Y-Zr bzw.  $\text{TiO}_2$ -Zr-Korrelation widerspiegeln würde.

Die Metapyroxenite weisen keine Korreltaion dieser Art auf; akkumulative Anreicherung von Olivin (oder auch Orthopyroxen) kann somit ausgeschlossen werden. Dies ist ein weiterer Hinweis dafür, daß die Metapyroxenite primären, unveränderten ultramafischen Laven entsprechen und die Bezeichnung als Komatiite gerechtfertigt ist.

An dieser Stelle soll nochmals die große Ähnlichkeit der Amphibolite I mit den Apollo 11-Basalten hervorgehoben werden, die deshalb in die Korrelationsdiagramme Zr-Cr,  $\text{TiO}_2$ -Zr und Y-Zr mit eingetragen wurden. Die Amphibolite I erreichen zwar nicht die hohen Elementkonzentrationen, aber sie bilden Trends aus, die nahezu identisch mit denen der Mondbasalte sind. Es ist daher naheliegend, daß die Amphibolite I und die Apollo 11-Basalte aus einem ähnlich zusammengesetzten Ausgangsmaterial unter vergleichbaren P-T-Bedingungen hervorgegangen sind. Als weiteres Argument dafür kann die Zusammensetzung der Talk- Anthophyllitschiefer gesehen werden; mit Ausnahme des verwitterungsbedingten Ca-Verlustes sind sie anhand der Si-Mg- und Al-Gehalte mit dem von RINGWOOD & ESSENE (1970) experimentell ermittelten Modellpyroxenit vergleichbar, der als mögliches Ausgangsmaterial für die Apollo 11-Basalte angenommen wird. Ähnliche Schlußfolgerungen wurden auch von CONDIE & BARABAR (1974) für die archaischen Grüngesteine von Abitibi (Kanada) gezogen, deren Seltenen Erden-Spektrum mit dem von Basalten der lunaren Maare vergleichbar ist.



#### 4.9.5. Modell zur Genese des Amphibolitkomplexes

An einer Schwächezone der archaischen Erdkruste, die bis in den oberen Mantel hinunterreicht, entsteht ein Manteldiapir, in dem durch partiales Aufschmelzen ein Ca- und P-reiches wahrscheinlich basaltisches Magma gebildet wird. Der Calciumreichtum spricht für eine Bildungstiefe von mehr als 27 Kilobar (Vergleich mit experimentellen Daten unter  $H_2O$ -freien Bedingungen) in der die Schmelze im Gleichgewicht mit Olivin + Orthopyroxen + Klinopyroxen + Granat steht. Während des Aufstiegs differenziert die Schmelze durch fraktionierende Kristallisation in ein granodioritisches Magma und ein apatitreiches Pyroxenakkumulat, die in Oberflächennähe intrudieren oder möglicherweise entlang von Störungssystemen als Kristallbrei an die Oberfläche dringen. Die Kristallisation muß in geringer Tiefe erfolgt sein, wo aluminiumreicher Pyroxen nicht mehr stabil war und stattdessen Ca-reicher Klinopyroxen ausgeschieden wurde.

Nach einer längeren Ruhephase, die durch Erosionsprodukte von Granodiorit als auch Apatit-Pyroxenit gekennzeichnet ist, werden im Bereich des aktiven Störungssystems die den Amphiboliten I entsprechenden Basalte extrudiert. Diese werden aufgrund der bisherigen Ergebnisse durch zwei oder vielleicht auch mehrere Aufschmelzphasen gebildet, deren Produkte sich miteinander mischen und auf dem Weg nach oben einer fraktionierenden Kristallisation ausgesetzt sind. Der Entstehungsbereich dieser primären Basite kann aufgrund experimenteller Ergebnisse des Kristallisationsverhaltens von Olivintholeiiten (GREEN & RINGWOOD, 1967) zwischen 10 und 20 kbar ( $H_2O$ -frei) angesiedelt werden. In diesem Druckintervall ist die gebildete Schmelze im Gleichgewicht mit Olivin, aluminiumreichen Klino- und Orthopyroxen sowie  $\pm$  Spinell.



Die Zusammensetzung der primär gebildeten Basite und der folgenden Mafitite und Ultramafitite ist ohne die Voraussetzung eines angereicherten Mantels nur schwer zu erklären. Die Konzentration der Elemente Ca, Fe, Ti, Sr und Zr in den Metabasalten sowie Si in den Ultramafititen lassen auf einen angereicherten Erdmantel mit Überschuß an Klinopyroxen(?Ti-Augit) also auch Orthopyroxen schließen. Dies wäre auch eine Erklärung für die Ähnlichkeit der primären Basite mit den Mondbasalten für die RINGWOOD & ESSENE (1970) aufgrund experimenteller Daten einen ausschließlich aus Opx und Cpx bestehenden Ausgangsmantel postulieren.

Die niedrigen  $\text{SiO}_2$ -Gehalte sowie der alkalibasaltähnliche Spurenelementchemismus der Metabasalte stehen im Widerspruch zu den äußerst geringen Alkaligehalten und dem tholeiitischen Hauptelementchemismus dieser Metabasalte. Die  $\text{SiO}_2$ -Gehalte sind in Relation zu den hohen Fe-, Ti- und Ca-Konzentrationen zu sehen und mit der Anreicherung von Klinopyroxen zu begründen. Die Alkaliarmut wäre durch ein geringes  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ -Verhältnis zu erklären: Ein erhöhter Wassergehalt im Erdmantel führt zu einer Senkung der Solidustemperatur zugunsten des Aufschmelzgrades (RINGWOOD, 1975), was im Fall eines Cpx-angereicherten Mantels eine Erhöhung der Fe- und Ca-Gehalte sowie eine Verringerung der Alkaligehalte in der Schmelze nach sich ziehen könnte. Die hohen Chromgehalte der Zr-reichsten Amphibolite (geringster Aufschmelzgrad) bedürfen ebenfalls einer Erklärung. Zur Lösung dieses Problems bieten sich folgende Möglichkeiten an:

1. Die Cr- und Zr-reichen Proben der Amphibolite I weisen gleichzeitig auch hohe Ti-Gehalte auf. Ilmenit kann nach ALLEGRE et al. (1977) relativ viel Cr einbauen (Verteilungskoeffizient Mineral/Schmelze = 10) und käme somit als Chromlieferant in Frage.



2. Die hohen Cr-Gehalte beruhen auf einem niedrigen Sauerstoff partialdruck, wie es von RINGWOOD & ESSENE (1970) für die Apollo 11-Basalte erklärt wird.

Die letzte Überlegung kann nahezu ausgeschlossen werden, weil in diesem Fall alle Magmatite des Amphibolitkomplexes erhöhte Chromgehalte aufweisen müßten. Dagegen könnte die Existenz von Ilmenit als primäre Phase im Erdmantel, die bei Schmelzbeginn sofort instabil wird, eine Erklärung für die hohen Cr-Gehalte der Ti-reichen Amphibolite I sein.

Die letzte Phase magmatischer Aktivität ist durch die Extrusion der den Amphiboliten II entsprechenden Mafitite und der Ultramafitite gekennzeichnet. Aus den Variationen von Zirkon und Yttrium ist ersichtlich, daß die Entstehung dieser Magmen am besten mit sukzessivem partiellem Aufschmelzen erklärt werden kann. Die Wechsellagerung der beiden Magmentypen spricht für eine mehr oder weniger gleichzeitige Bildung, die aber in Bereichen unterschiedlicher Temperatur und Zusammensetzung stattgefunden haben muß. Die Heterogenität im Manteldiapir könnte wie schon erwähnt auf die Bildung der primären Basalte zurückzuführen sein. Die Temperaturunterschiede können nach ARNDT (1977) dadurch entstehen, daß ein Manteldiapir heißer als seine Umgebung ist und deshalb in seinen Randbereichen ein durch Wärmeabgabe bedingtes Temperaturdefizit existiert. Diese Temperaturdifferenzen können die Ursache für Konvektionsströmungen sein die für die Mischung von Magmentypen unterschiedlichen Aufschmelzgrades verantwortlich sind.

Die Ultramafitite des Amphibolitkomplexes haben im Vergleich zu entsprechenden Gesteinen archaischer Greenstonebelts eine ungewöhnliche Zusammensetzung, die durch einen positiven  $MgO-SiO_2$ -Trend gekennzeichnet ist (Abb. 14) d. h. die magnesiumreichsten Talk-



schiefer weisen die höchsten  $\text{SiO}_2$ -Gehalte auf. Der für die Bildung der Ultramafitite verantwortliche Bereich des oberen Erdmantels muß also erheblich an Orthopyroxen angereichert gewesen sein. Dieses Phänomen könnte auf hohe Wassergehalte im archaischen Erdmantel zurückgeführt werden. Der Einfluß von  $\text{H}_2\text{O}$  (und  $\text{CO}_2$ ) auf das Schmelzverhalten des Erdmantels wurde von einer Reihe von Autoren experimentell untersucht (z. B. KUSHIRO, YODER & NISHIKAWA 1968; EGGLE 1973; MYSEN 1973; HODGES 1973; NICHOLLS & RINGWOOD 1974). Die Abb. 39 zeigt, daß während der Aufschmelzung von Enstatit bei hohen Wassergehalten nicht mehr Enstatit sondern Forsterit mit der Schmelze im Gleichgewicht ist und auf diese Weise ein  $\text{SiO}_2$ -übersättigtes Magma gebildet werden kann. Gleichzeitig erfolgt eine deutliche Absenkung der Solidustemperatur, was im Vergleich zu  $\text{H}_2\text{O}$ -armen Systemen einen erhöhten Grad an partiellem Aufschmelzen bedeutet.

Höhere Drucke sowie die Zugabe von Diopsid verändern nach KUSHIRO et al. (1968) nichts an diesem Prozess der Partialaufschmelzung, d. h. durch partielles Aufschmelzen eines aus Forsterit, Enstatit und Diopsid bestehenden Erdmantels können in Gegenwart von ungebundenem Wasser  $\text{SiO}_2$ -gesättigte Schmelzen gebildet werden. Dieser Prozess gibt aber noch keinen Aufschluß über die für die Bildung der  $\text{SiO}_2$ -reichen Ultramafitite benötigte Opx-Anreicherung.

Eine Lösung dieses Problems kann in Differentiationsvorgängen in der frühen Erdgeschichte gesehen werden:

Nach FISHER (1976) und WALKER (1977) kann mit großer Sicherheit angenommen werden, daß die Atmosphäre und Hydrosphäre der Erde durch Entgasungsvorgänge aus dem Erdinneren entstanden sind. Die Entgasung der Erde mußte nach YODER (1976) eine extensive Metasomatose des oberen Erdmantels zur Folge gehabt haben. Ein wichtiger Effekt bei der Aufschmelzung eines  $\text{H}_2\text{O}$ -reichen Erdmantels ist die Tatsache,



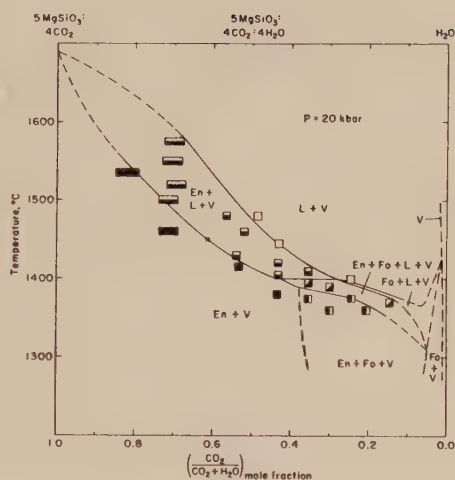
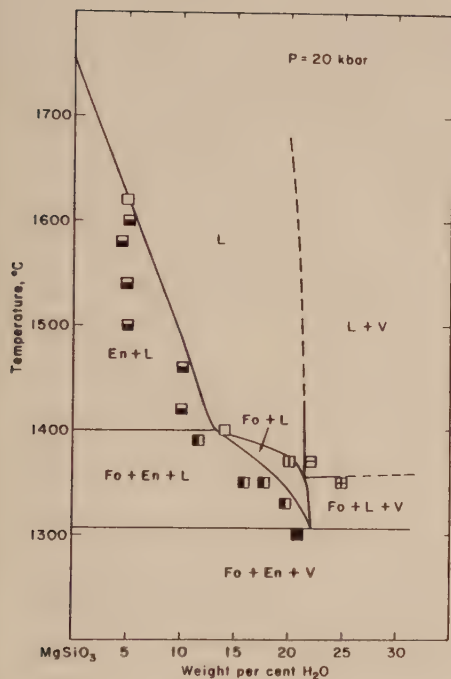


Abb. 39: Die Systeme  $\text{MgSiO}_3\text{-H}_2\text{O}$  und  $\text{MgSiO}_2\text{-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$  bei 20 kbar (EGGLER, 1972).

daß bei hohen Wassergehalten eine Gasphase existiert, die, wenn sie mit Forsterit und der Schmelze im Gleichgewicht steht, aus stöchiometrischen Gründen  $\text{SiO}_2$  enthalten muß. Die Untersuchungen von NAKAMURA & KUSHIRO (1974) zeigen, daß diese Gasphase bei einem Druck von 15 kbar im Temperaturbereich von  $1150 - 1450^{\circ}\text{C}$  bis zu



20 %  $\text{SiO}_2$  enthalten kann. Obwohl die Gegenwart von  $\text{CO}_2$  die Löslichkeit von  $\text{SiO}_2$  reduzieren könnte, würde der Aufstieg dieses Gases eine Anreicherung der oberen Partien des Erdmantels an Enstatit auf Kosten von Forsterit bewirken (YODER, 1976). Es ist also durchaus vorstellbar, daß die Entgasungsvorgänge aufgrund der Schmelztemperaturerniedrigung partielle Aufschmelzungen im Erdinneren verursachen, die wiederum für eine Enstatitanreicherung im oberen Erdmantel verantwortlich sind.

## 5. Überlegungen zur Genese der archaischen Erdkruste und ihre Erzlagerstätten.

### 5.1. Die archaische Erdkruste.

Die auf der Entgasung der Erde beruhenden Überlegungen zu den Aufschmelzprozessen eines wasserreichen Erdmantels liefern wesentliche Grundlagen, um den genetischen Zusammenhang der für das frühe Präkambrium typischen Gesteinsassoziationen zu klären.

YODER (1976) hält es für wahrscheinlich, daß die durch vulkanische Prozesse gebildete primitive Erdkruste von andesitischer Zusammensetzung war, da Andesite nach heutiger Auffassung als Aufschmelzprodukte eines  $\text{H}_2\text{O}$ -reichen Erdmantels zu betrachten sind.

Erste Indizien für einen größeren Einfluß von Wasser bei der Bildung archaischer Kruste sind durch den geologischen Aufbau der Greenstonebelts gegeben. Die "sekundären Greenstones" (GLIKSON, 1975), die entweder im Hangenden der "primären Greenstones" auftreten oder einem granitischen Basement aufliegen, sind häufig durch eine Basalt-Andesit-Rhyolit-Abfolge geprägt, die untergeordnet eine ultramafische Komponente beinhaltet. Dieser kalkalkalische Vulkanismus erinnert



für ein den heutigen Inselbögen äquivalentes Entstehungsmilieu, das durch die Subduktion wasserreicher ozeanischer Kruste entscheidend bestimmt wird ( $H_2O$ -Zufuhr). Aus diesem Grund wird von mehreren Autoren (z. B. HART et al., 1970; GOODWIN, 1973) ein Subduktionsvorgang für die Bildung der Greenstonebeltabfolgen gefordert.

Es gilt jedoch als gesichert, daß im Archaikum ein hoher geothermischer Gradient existiert hat (DRURY, 1978). Nach GREEN (1975) kann bei einem erhöhten archaischen geothermischen Gradienten keine Subduktion ozeanischer Kruste erfolgen, da in diesem Fall keine Eklogitisierung möglich ist. Das für die Bildung der Kalkalkalivulkanite notwendige Wasser muß also bereits im Erdmantel vorhanden gewesen sein.

Ein an Enstatit angereicherter archaischer oberer Erdmantel wäre eine ideale Voraussetzung für die Produktion intermediärer und saurer Magmatite, zumal dieser Mechanismus die Bildung einer sialischen Kruste zweifellos beschleunigen würde. Ein weiterer Hinweis auf die Existenz einer  $SiO_2$ -reichen Gasphase bei Aufschmelzprozessen im archaischen Erdmantel ist in der Zusammensetzung der "primären Grüngesteine" (GLIKSON, 1975) zu sehen, die durch Wechselfolgen von ultramafischen bis mafischen Vulkaniten mit sauren chemischen Sedimenten charakterisiert sind. Die Überlegungen zur Genese ultramafischer Vulkanite haben aufgezeigt, daß die zugrundeliegenden Aufschmelzprozesse sehr wahrscheinlich nur in geringer Tiefe erfolgen. Die  $SiO_2$ -reiche Gasphase hat in diesem Fall kaum mehr Gelegenheit mit dem Erdmantel zu reagieren, und wird mit der Schmelze extrudiert, wobei die  $SiO_2$ -Komponente in wässriger Lösung dem Meerwasser zugeführt wird. Dies hat plötzlich eine  $SiO_2$ -Übersättigung zur Folge, die zur Ausfällung der Cherthorizonte und unter gegebenen Umständen



zur Bildung der gebünderten Eisenerze führen konnte.

Die unterschiedliche Zusammensetzung der primären und sekundären Greenstonebelts kann auf die stratigraphisch jüngere Position der Letzteren zurückgeführt werden, die immer einem sialischen Basement aufliegen. Im Gegensatz zu den für die Bildung der primären Greenstones verantwortlichen Magmen, müssen die Schmelzen eine wesentlich dickere Kruste durchdringen und haben so die Möglichkeit durch Differentiationsvorgänge intermediäre und saure Endglieder auszubilden. Die größere Distanz zwischen Schmelzherd und Erdoberfläche wäre auch eine Erklärung für den untergeordneten Anteil ultramafischer Laven in den sekundären Greenstoneabfolgen.

## 5.2. Die Mineralisationen der archaischen Grüngesteinsareale

Die archaischen Granit-Greenstone-Gebiete sind bekannt als potentielle Rohstoffträger und deshalb für die Lagerstättenforschung von großer Bedeutung.

Im Idealfall ist ein Greenstonebelt aus drei Einheiten aufgebaut: Eine ultramafisch-mafische Serie an der Basis wird im Hangenden von einem Zyklus basisch-intermediär-saurer Vulkanite abgelöst, die wiederum von sedimentären Abfolgen überlagert werden.

Es existiert eine enge genetische Abhängigkeit zwischen den lithologischen Untergruppen der archaischen Greenstonebelts und der Art und Verbreitung der Mineralisationen, von denen in Anlehnung an ANHAEUSER (1976) ein kurzer Überblick gegeben werden soll.

a. Die ultramafisch-mafischen Vulkanite und Plutonite sind charakterisiert durch Mineralisationen von Nickel (und Kupfer) Chrom, Gold, Asbest, Magnesit und Talk. Die Häufigkeit dieser Vorkommen wächst mit dem Anteil ultramafischer Gesteine.

b. In den basisch bis sauren Vulkaniten treten Lagerstätten von Antimon, Gold, Kupfer, Blei, Zink und massiven sulfidischen Eisenerzen



neben geringeren Vorkommen von Quecksilber, Baryt und Korund auf. Silber, Wolfram (Scheelit) und Arsen sind Nebenprodukte des Goldabbaus. Größere Buntmetallvorkommen sind auf den Kanadischen Schild beschränkt.

c. Als archaische sedimentäre Lagerstätten sind Gold-Pyrit Vorkommen in Konglomerat-Quarzit-Formationen, Banded Ironstones sowie geringe Kalkablagerungen bekannt.

d. Die archaischen Granit-Pegmatit-Areale weisen eine Vielzahl von Mineralisationen auf. Mit Ausnahme von Zinn, Wismuth, Molybdän und Tantalit-Columbit treten hauptsächlich nichtmetallische Vorkommen von Beryllium, Lithium, Cesium, Glimmer, Korund und Graphit auf. Die meisten dieser Lagerstätten sind mit Pegmatiten assoziiert, die entweder randlich der Greenstonebelts oder in Gebieten mit zahlreichen xenolithischen Grüngesteinsresten zu finden sind.

Die auf den bekannten archaischen Kratonen unterschiedliche Häufigkeit und Verteilung der Mineralisationen wird auf die differierenden Proportionen der lithologischen Untergruppen sowie auf die zeitliche Varianz in der Alterstellung der einzelnen Greenstonebelts zurückgeführt.

### 5.3. Überlegungen zur Genese der archaischen Erzlagerstätten

Es ist zu erwarten, daß die bei der Bildung der Erdkruste diskutierte Existenz eines wasserreichen Erdmantels auch für die Bildung der archaischen Erzlagerstätten mitverantwortlich ist. Als deutlicher Hinweis hierauf kann die Erzparagenese in den "sekundären" Greenstonebelts betrachtet werden. Die Mineralisationen dieser mafisch bis felsischen Abfolgen sind direkt mit den Vererzungen konvergierender Plattenränder vergleichbar, die als Sb-W-Hg-Formation zusammengefaßt sind, und mit vulkanischen Aktivitäten an tiefreichenden Benioffzonen



in Verbindung gebracht werden (HÖLL, 1975; MAUCHER, 1976). Im Rahmen dieser Subduktionsvorgänge wird im größeren Stil Wasser in den oberen Erdmantel eingebracht. Es ist also wahrscheinlich, daß ein hoher  $H_2O$ -Anteil im Erdmantel nicht nur die Zusammensetzung der Eruptiva, sondern auch deren Erzparagenese entscheidend beeinflußt, wie es schon von HÖLL (1975) für die Genese der Scheelitlagerstätte Felbertal/Österreich postuliert worden ist.

Nach SATO (1976) könnte das Wasser für die Konzentration der Erzmehmetalle in zweierlei Hinsicht bedeutsam sein: 1. Es sinkt die Solidustemperatur des Magmas und ermöglicht so eine intensivere Differentiation. 2. Es konzentriert Metalle, Schwefel und Halogene effektiv im restlichen Magma und daraus folgend in den Erzlösungen.

Das Elementspektrum der Metallführung, die das Wolfram in der Lagerstätte Felbertal begleitet, eröffnet einen weiteren interessanten Aspekt zur Genese der archaischen Lagerstätten. Neben den deutlichen Anreicherungen an Sb, As, Hg, Au, Ag, Cu, Pb und Zn, die den Erzparagenesen der "sekundären Greenstonebelts" entspricht, sind auch wesentlich erhöhte Konzentrationen der Elemente Mo, Li, Bi, Be, Cs, Sn, Nb und Ta zu beobachten. (HÖLL, 1975). Diese Elemente entsprechen exakt denjenigen, die in den Pegmatiten der archaischen Kratone angereichert sind und z. T. wirtschaftlich bedeutsame Mineralisationen ausbilden. Nach ANHAEUSSER (1976) sind die vererzten Pegmatite fast immer mit den Greenstonebelts assoziiert oder treten in Gebieten mit zahlreichen xenolithischen Grüngesteinsresten auf. Diese beiden Beobachtungen lassen die Folgerung zu, daß die mit den Pegmatiten verbundenen Mineralisationen von Mo, Bi, Li, Be, Cs, Sn, Nb und Ta auf eine primäre Anreicherung im Zusammenhang die dem Bildungsmechanismus der Greenstonebelts zurückzuführen sind.



Die Mineralisationen der "primären Greenstonebelts" (Ni, Cu, Cr, Au, Asbest, Talk, Magnesit) stehen in keinem Widerspruch zu den obigen Überlegungen, da sie direkt an die ultramafisch-mafischen Vulkanite und Plutonite gebunden sind und die Häufigkeit dieser Vorkommen von dem Anteil ultramafischer Gesteine abhängig ist. Die Ausführungen über die Rolle von  $H_2O$  bei Aufschmelzungsvorgängen haben gezeigt, daß zunehmende Wassergehalte eine Schmelzpunktniedrigung zur Folge haben. Diese Tatsache im Zusammenhang mit einem erhöhten geothermischen Gradienten könnte die Ursache für die Bildung der für das Archaikum spezifischen Ultramafitite sein und somit auch für die damit verbundenen Mineralisationen.

#### 6. Die Mineralisationen des präkambrischen Basements von Nigeria.

Die geochemischen Untersuchungen haben ergeben, daß der Amphibolitkomplex sehr wahrscheinlich mit zu den ältesten auf der Erde bekannten Gesteinsabfolgen gezählt werden kann. Es ist daher anzunehmen, daß im nigerianischen Basement auch die für das Archaikum charakteristischen Mineralisationen vorzufinden sind.

Das Elementspektrum der in Nigeria bekannten Mineralisationen von Au, Sn, Nb, Ta, W, As, Cu, Pb, Zn, Mo, Li, Be, Ag, und Ni (CORRAY, 1974; HUBBARD, 1975; KOGBE, 1975) unterstützt die obige Aussage.

Speziell die pegmatitischen Vorkommen von Zinnstein, Columbit-Tantalit, Beryll und Turmalin sowie die mit den metavulkano-sedimentären Abfolgen assoziierten Vererzungen von Gold, Silber, Bleiglanz, Arsenkies, Molybdenit, Pyrit und Kupfersulphiden können direkt mit den Vererzungen der archaischen Grüngesteinsareale verglichen werden. Diese Übereinstimmung wird zusätzlich durch zahlreiche Vorkommen metamorph überprägter gebänderter Eisenerze untermauert. Minerali-



sationen von Wismuth, Antimon und Quecksilber sind im nigerianischen Basement bisher nicht bekannt; diese Elemente gehen jedoch unter gegebenen Umständen leicht flüchtige Verbindungen ein und sind möglicherweise während der hochtemperierten Metamorphose diffundiert. Im Einklang mit den Überlegungen zur Genese der archaischen Mineralisationen sollten sämtliche Elemente dieser Paragenese erhöhte Konzentrationen in den Metavulkaniten des Amphibolitkomplexes aufweisen, was jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht generell nachzuprüfen war. Folgende Fakten sprechen jedoch für diese These:

- Die Metavulkanite des Amphibolitkomplexes weisen Au-Gehalte bis zu 50 ppb auf; goldhaltige Quarzgänge und Adern sind in Amphiboliten und Hbl-Gneisen häufiger als in rein sedimentärer Umgebung (COORAY, 1974); weitere Bereiche wirtschaftlich rentablen Goldabbaus waren fluviatile Anreicherungshorizonte im Bereich von Talk-Anthophyllit-Schiefern westlich Ilesha (= the golden city). (AJAYI, 1971)
- Ein Teil der Ultramafitite enthält Pb- und Zn-Konzentrationen bis über 500 ppm.
- In einer dem Amphibolitkomplex äquivalenten Metavulkanitabfolge in der Gegend von Egbe, nordöstlich von Ilesha, sind Scheelitfundpunkte bekannt (MATHEIS, mdl. Mitt.).
- Die erzhaltigen Pegmatite östlich von Ilesha und bei Egbe weisen mit Sn, Nb, Ta, Li und Be das gleiche Elementspektrum wie die Pegmatite von Südafrika und Zimbabwe auf und sind analog zu diesen ebenfalls mit Metavulkaniten assoziiert.

Die präkambrischen Sn-Nb-Ta-Pegmatite sowie die mit den jurassischen Graniten des Jos-Plateaus verbundenen Vererzungen von Sn-W-Cu-Pb und Zn liegen nach WRIGHT (1970) einem alten Lineament-system auf, wobei allerdings von WRIGHT die Frage offen gelassen wird, ob diese Lineamente die Erzbringer sind oder nur für den



Transport der Erzlösung verantwortlich sind.

Die Tatsache, daß die vererzten Pegmatite immer im Randbereich meta-vulkanischer Abfolgen zu finden sind, spricht deutlich für die zweite Lösung, zumal alte Lineamentsysteme und insbesondere die Kreuzungsbereiche dieser Lineamente aufgrund erhöhter Krusteninstabilität ein ideales Umfeld für die Platznahme der Pegmatite darstellen.

Die aus den Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse im engeren Sinne, die geologischen, geochemischen und erzparagenetischen Ähnlichkeiten der metavulkano-sedimentären Abfolgen des Ife-Ilesha Gebietes mit den archaischen Grüngesteinsarealen, legen eine Prospektion auf die für das Archaikum typischen Mineralisationen nahe. Als weitere Objekte von Interesse kommen aufgrund der lokalen Verhältnisse die Suche nach lateritischen Bildungen von Phosphaterden und Bauxit in Betracht.

## 7. Abschließende Bemerkungen

Die Erkenntnisse über die Genese und das Alter des Amphibolitkomplexes verknüpft mit den Überlegungen zur Entstehung der archaischen Erdkruste und ihrer Erzlagerstätten können zu folgenden Schwerpunkten zusammengefaßt werden:

- a) Der archaische obere Erdmantel war im Vergleich zu heute wesentlich reicher an Klinopyroxen, wodurch sowohl die hohen  $\text{FeO/MgO}$ - und  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{CaO}$ -Verhältnisse in den Tholeiitbasalten im Verlauf der Erdgeschichte erklärt werden können.
- b) Das heutige Meerwasser wurde durch Entgasungsvorgänge der Erde im Archaikum gebildet. Die Entgasung der Erde bzw. die Aufschmelzung



des oberen Erdmantels unter hohen  $H_2O$ -Drucken hatte folgende Auswirkungen:

- Der archaische obere Erdmantel wurde an Opx angereichert, was die Existenz  $SiO_2$ -reicher Ultramafitite sowie kalkalkalischer Gesteine erklärt.
- Die Schmelztemperatur des oberen Erdmantels wird drastisch erniedrigt, so daß ultrabasische Laven auch in geringer Tiefe gebildet werden können.
- Die durchströmende Gasphase konzentriert Metalle, Schwefel und Halogene im oberen Erdmantel und forciert somit die Bildung der archaischen Erzlagerstätten.

Die Entgasung der Erde kann somit als entscheidender Faktor für die Entstehung der archaischen Kruste und ihrer spezifischen Merkmale betrachtet werden. Es bleibt jedoch die Frage, ob diese Entgasungsvorgänge im frühen Präkambrium eine maximale Intensität aufweisen oder gleichmäßig im Verlauf der Erdgeschichte stattgefunden haben. In Übereinstimmung mit WALKER (1977) wird aufgrund folgender Überlegungen die erste Lösung bevorzugt. Nach KUSHIRO et al. (1968) wird bei niedrigen Wassergehalten im Erdmantel nur eine geringe Menge an Schmelze gebildet, deren Entfernung aus dem Erdmantel ein mehr oder weniger wasserfreies Residium hinterlassen würde. Für die Bildung von ultrabasischen Magmen wird also nicht nur ein hoher Wassergehalt zur Schmelzpunkterniedrigung benötigt, sondern ebenfalls ein regelmäßiger Nachschub an  $H_2O$ , um den Aufschmelzprozess in Gang zu halten. Die zeitliche Beschränkung der Komatiite auf das Archaikum kann deshalb als Indiz für eine maximale Intensität der Entgasung während dieses Zeitraums angesehen werden.

Eine weitere Überlegung gilt dem geologischen Milieu des Amphibolit-



komplexes. Die geologisch-geochemischen Untersuchungen haben gezeigt, daß der Amphibolitkomplex am besten mit den Vulkaniten ozeanischer Inseln vergleichbar ist, wobei aber in nächster Umgebung intermediäre bis saure Krustenpartien existiert haben müssen. Dies ist möglicherweise ein Hinweis auf eine andesitische Urkruste, wie sie von YODER (1976) für wahrscheinlich gehalten wird.

Ein archaischer Ozeaninselvulkanismus ist zwar bisher noch nicht beschrieben worden, findet aber bei FYFE (1978) eine gute Unterstützung. Nach FYFE (1978) können viele Merkmale der archaischen Kruste nicht durch einen modernen Ozeanrückenvulkanismus produziert werden, sondern durch das Auftreten einer großen Anzahl von Hot Spots, was er als 'Hot Spot Tektonik' bezeichnen würde. Eine Vielzahl von Hawaiis, die auf einer lagigen Kruste aus sauren bis basischen Vulkaniten extrudieren, könnte eine ähnlich zerstreute Krustenstruktur verursachen, wie sie auf der geologischen Karte von Zimbabwe zu finden ist (FYFE, 1978).

Die archaischen Grüngesteinsabfolgen sind auf der heutigen Erdoberfläche weitverbreitet und können trotz ihres hohen Alters weit häufiger als mesozoische und tertiäre Ophiolitabfolgen beobachtet werden. Die Ursache dafür ist in dem hohen archaischen geothermischen Gradienten zu sehen, der keine Subduktion erlaubt und so kein 'Recycling' basischer Erdkruste in den oberen Mantel möglich macht. Konvektionsbedingte horizontale Bewegungen der Lithosphäre müssen daher im Archaikum viel mehr eine Krustenverkürzung zur Folge gehabt haben, die für die Krustenverdickung und Stabilisierung der archaischen Kratone mit verantwortlich ist.

Eine Abtrennung archaischer basischer Kruste von einer peridotiti-



schen Lithosphäre sowie die Verfaltung und Verschweißung mit 'primitiven' sialischen Krustenpartien könnte in Übereinstimmung mit GREEN (1975) die Erklärung für die Konservierung der archaischen Grüngesteinsabfolgen sein.



Literaturverzeichnis

- AHRENS L.H., MICHAELIS H., 1969: The composition of stony meteorites: some aspects of the composition of the basaltic achondrites. - Earth planet Sci. Let., 6, 304 - 308
- AJAYI T.R., 1974: The gold deposits of Nigeria - a compilation. - Univ. Ife B. Sc. Sp. Prof. Rept. (unpubl.)
- ALLEGRE, C.J., TREUIL M., MINISTER J.F., MINISTER B., ALBAREDE F., 1977: Systematic use of trace elements in igneous-process, part I. - Contrib. Min. Petrol., 60, 57 - 75.
- ANHAEUSSER C.R., 1976: Archean metallogeny in Southern Africa. - Econ. Geol. 71.
- ARNDT N.T. 1977: Ultrabasic magmas and high degree melting of the mantle Contrib. Min. Petrol. 64, 205 - 221.
- ARTH J.G., ARNDT N.T., NALDRETT A.J., 1977: Genesis of archean komatiites from Munro Township, Ontario: Trace element evidence. - Geology, 5, 590 - 594.
- BECCALUVA L., OHNENSTETTER D., VENTURELLI G., 1977: The trace element chemistry of corsican ophiolites. - Contrib. Min. Petrol., 64, 11 - 31
- BECCALUVA L., PICCARDO G.B., SERRIG G., 1979: Petrology of northern Apennine ophiolites and comparison with other tethyan ophiolites. - ophioliti, 4 (1), 43 - 66.
- BROOKS C., HART S.R., 1974: On the Significance of Komatiite. - Geology (2), 107 - 110
- BRYAN W.B., FREY F.A., THOMPSON G., 1977: Oldest atlantic seafloor. - Contrib. Min. Petrol., 64, 223 - 242.
- BULTITUDE R.J., 1976: Flood basalts of probably early cambrian age in northern Australia. - in Volanism in Australia, Elsevier Scientific Publishing Company.
- CANN J.R., 1970: Petrology of basalts dredged from the Gulf of Aden. - Deep Sea Res., 17, 477 - 482
- CANNON R.T., 1964: The geology of the Bartica Assemblage: - Bull. Geol. Surv. British Guyana, 35, 26 - 27.
- CAWTHORN R.G., 1975: Degrees of melting in mantle diapirs and the origin of ultra basic liquids. - Earth Planet. Sci. Let., 23, 113 - 120
- CHAZEN S.I., VOGEL T.A., 1974: Distribution of Ti and P in oceanic basalts as a test of origin. - Contr. Min. Petr., 43, 307 - 316.



- COISH R.A., 1977: Ocean floor metamorphism in the Belts Cove Ophiolite, Newfoundland. - *Contr. Min. Petr.* 65
- CONDIE K.C., 1976: Trace element geochemistry of archean greenstone belts. - *Earth-Sci.Rev.*, 12, 4, 393 - 417.
- CONDIE K.C., BARAGAR W.R.A., 1974: Rare earth element distributions in volcanic rotes from archean greenstone belts. - *Contr. Min. Petr.*, 45, 237 - 246.
- COORAY P.G., 1974: Aspects of the precambrian of Nigeria. - *Handout*, 25 pp. Department of Geology, Univ. Ife.
- COX K.G., HORNING G., 1966: The petrology of the Karoo basalts of Basutoland. - *Am. Miner.*, 51, 1414 - 32.
- DE SWARDT A.M.J., OGBUKAGO J.K., HUBBARD F.H. 1965: Geological map, 1 : 250 000, Sheet 60 (IwO), Geological Survey of Nigeria.
- DRURY S.A. 1978: Basic factors in archean geotectonics. - In B.F. Windley and S.M.Naqvi (eds.), *Archean Geochemistry*. Elsevier Scientific Publishing Company.
- EGGLER D.H., 1973: Role of CO<sub>2</sub> in melting processes in the mantle. *Carnegie Inst., Washington Yearb.*, 72, 457 - 467.
- EISENACH P., 1979: Magnetmineralische Untersuchungen an Ozeanbasalten des DSDP. - unveröff. Diss. Univ. München.
- ENGEL A.E.J., ENGEL C.G., HAVENS R.G., 1965: Chemical characteristics of oceanic basalt and the upper mantle. - *Geol. Soc. Am. Bull.*, 76, 719 - 733.
- ENGEL C.G., FISHER R.L.: Granitic to ultramafic rock complexes of the Indian ocean ridge system. - *Bull. Geol. Soc. Am.*, 86, 1553 - 1578.
- FISHER D.E., 1974: Rare gas clues to the origin of the terrestrial atmosphere. - In B.G. Windley (ed.), *The Early History of the Earth*, New York.
- FLOWER M.F.J., ROBINSON P.T., SCHMINKE H.U., OHNHAUCHT W., 1977: Magma fractionation systems beneath the mid-atlantic ridge at 36 - 37° N. *Contrib. Min. Petrol*, 64, 167 - 195
- FRANCHETEAU J., LE PICHON X., 1972: Marginal fracture zones as structural frame work of continental margins in the South Atlantic Ocean. - *J. Geophys. Res.*, 56, 991 - 1007.
- FYFE W.S., 1978: The exolution of the earth's crust: modern plate tectonics to ancient hot spot tectonics? - *Chemical Geology*, 23 (2) 89 - 114.



- GARCIA M.O., 1978: Criteria for the identification of ancient volcanic arc. - *Earth-Sci. Rev.* 14, 2, 147 - 166.
- GASS I.G., MALLICK D.J., COX K.G., 1973: Volcanic islands in the red sea. - *J. Geol. Soc.*, 129, 275 - 310.
- GLIKSON A.Y., 1976: Stratigraphy and evolution of primary and secondary greenstones: Significance of data from shields of the southern hemisphere. - In B.F.Windley: The early history of the earth, J. Wiley & Sons, New York.
- GOODWIN A.M., 1973: Plate tectonics and evolution of precambrian crust. - In D.H.Tarling and S.K.Runcorn (eds.), Implications of continental drift to the earth sciences, Academic Press, London.
- GRANT N.K., 1971: A compilation of radiometric ages from Nigeria. - *Nigeria Journ. Mining and Geology*, 6, 37 - 54.
- GRANT N.K., HICKMAN M., BURKHOLDER F.R., POWELL J.L., 1972: Kibaran metamorphic belt in Pan-African domain of West Africa - *Nature*, 238, 90 - 91.
- GREEN D.H., 1975: Genesis of Archean peridotitic magmas and constraints on Archean geothermal gradients and tectonics. - *Geology*, 3, 15 - 18.
- GREEN D.H., RINGWOOD A.E., 1967: The genesis of basaltic magmas. - *Contrib. Min. Petr.*, 15, 103 - 190.
- GUNN B.M., ROBOL M.J., 1975: in GUNN B.M., 1976: A comparison of modern and Archean crust and island-arc petrochemistry. - In B.F.Windley (ed.), The early history of the earth, J.Wiley & Sons, New York.
- GUNN B.M., ABRANSON C.E., NOUGIER J., WATKINS N.D., HAJASH A., 1971: Amsterdam, Island, an isolated volcano in the southern Indian Ocean. - *Contr. Mon. Petrol.*, 32, 79 - 92.
- HALLBERG J.A., 1972: Geochemistry of Archean volcanic belts in the Eastern Goldfields region of Western Australia. - *J. Petrol.*, 13, 45 - 56.
- HART S.R. et al., 1970: Ancient and modern volcanic rocks: A trace element model. - *Earth and Planetary Sci. Letters*, 10, 17 - 28.
- HART S.R., GLASSLEY W.E., KARIG D.E., 1972: Basalts and seafloor spreading behind the Mariana Island arc. - *Earth planet. Sci. Let.*, 15, 12 - 18.
- HODGES F.N., 1973: Solubility of H<sub>2</sub>O in forsterite melt at 20 kbar. - *Carnegie Inst. Washington; Yearb.* 72, 495 - 496.



- HÖLL R., 1975: Die Scheelitlagerstätte Felbertal und der Vergleich mit anderen Scheelitvorkommen in den Ostalpen. - Bayrische Akademie der Wissenschaften, Math.-naturw. Kl. Abh. neue Folge, 157 A.
- HUBBARD F.H., 1966: A provisional report on the Geology of 1:100.00, Sheet No. 262 (APOMU) and part of 1:100.00 Sheet No. 263 (ONDO) Gsn. Rpt. 1341.
- HUBBARD F.H., 1975: Precambrian crustal development in western Nigeria: Indications from the Iwo Region. - Geol. Soc. Am. Bull., 86, 548 - 554.
- HUNTER D.R., 1974: Crustal development in the Kaapvaal craton: 1. The archaean. - Precamb. Res., 1, 259 - 294.
- HURLEY B.M., LEO G.W., WHITE H.W., FAIRBAIRN H.W., 1971: Liberian age province (about 2700 m. y.) and adjacent provinces in Liberia and Sierra Leone. - Bull. Geol. Soc. Am., 82, 3483 - 3290.
- IBAROLLA E., 1969: Variationtrends in basaltic rocks of the Canary Islands. - Bull. Volc., 33, 729 - 777.
- IRVINE T.N., BARAGAR, W.R.A., 1971: A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. - Can. J. Earth Sci., 8, 523 - 540.
- KOGBE C.A., OBIALO, A.K., 1976: Statistics of mineral production in Nigeria (1946 - 1974) and the contribution of the mineral industry to the nigerian economy. - In C.A.KOGBE (ed.) Geology of Nigeria, Elizabethan Publ. Comp., Lagos, Nigeria.
- KUSHIRO J., YODER, H.S., NISHIKAWA, M., 1968: Effekt of water on the melting of enstatite. - Bull. Geol. Soc. Am., 79, 1685 - 1692.
- LAPADUE - HARGUES P., 1952: The origin of amphibolites. - Compt. rend., 234, 352 - 353.
- LE MAITRE R.W., 1962: Petrology of volcanic rocks, Gough Islands, South Atlantic. - Bull. Geol. Soc. Am., 73, 1309 - 40.
- MAC DONALD R., KATSURA, T., 1964: Chemical compositions of hawaiian lavas. - J. Petrol., 5, 82 - 133.
- MAC DONALD G.A., 1968: Composition and origin of hawaiian lavas. - Geol. Soc. Am. Mem., 116, 477 - 522.
- MANSON V., 1967: Geochemistry of basaltic rocks: major elements. - In HESS H.H., and Poldervaart, A. (eds.), Basalts, 215 - 69, New York, Interscience.



- MARMO V., 1957: Anthophyllite asbestos in central Sierra Leone. - Schweiz. Min. Petr. Mitt., 37, 31 - 50.
- MATHEIS G., 1976 Geochemical Mapping: A Tool for the Assessment of Nigeria's mineral potential. - Annual Conf. Nigerian Miner. Metall. Geol. Soc., Ibadan.
- MATHEIS G. & AKINWALE A.J., 1977: A Geochemical Soil Survey around Ifewara, Oyo State, Nigeria, and its Implication on Previous Geological Mapping of the Area. - Annual Conf. Nigerian Miner. Metall. Geol. Soc., Zaria.
- MAUCHER A., 1976: The strata-bound cinnabar-stibnite-scheelite deposits. - in K.H. Wolf (ed.), Handbook of stratabound and stratiform ore deposits. II. Regional studies and specific deposits. Elsevier Sci. Publ. Comp.
- MC BIRNEY A.R., WILLIAMS H., 1969: Geology and Petrology of the Galapagos Islands. - Geol. Soc. Am. Mem., 118.
- MC KENZIE D.P., WEISS N.O., 1975: Speculations on the thermal and tectonic history of the earth. - Geophys. J. R. astr. Soc., 42, 131 - 174.
- MIYASHIRO A., SHIDO F., EWING M., 1969: Diversity and origin of abyssal tholeiites from the Mid-Atlantic Ridge near 24° and 30° N latitude. - Contrib. Min. Petrol., 23, 38 - 52.
- MIYASHIRO A., 1975: Classification, Characteristics and origin of ophiolites. - J. Geol., 83, 249 - 281.
- MIYASHIRO A., SHIDO F., 1975: Tholeiitic and calcalkalic series in relation to the behaviours of titanium, vanadium, chromium and nickel. - Am. J. Sci., 275, 265 - 277.
- MYSEN B.O., 1973: Melting in a hydrous mantle: Phase relations of mantle peridotite with controlled water and oxygen fugacities. - Carnegie Inst. Washington, Yearb. 72, 467 - 478.
- NALDRETT A.J., CABRI L.J., 1976: Ultramafic and related rocks: Their classification and genesis with special Reference to the concentration of nickel sulfides and platinum-group elements. - Econ. Geol., 71, 1131 - 11358.
- NICHOLLS J.A., 1974: Liquids in equilibrium with peridotitic Mineral Assemblages at high water pressures. - Contrib. Min. Petr., 45, 289 - 316.
- NICHOLLS J.A., RINGWOOD A.E., 1973: Effect of water on olivine stability in tholeiites and the production of silica-saturated Magmas in the island-arc environment. - J. Geol., 81, 285 - 300.



- ODEYEMI J.B., 1979: Orogenic events in the precambrian basement of Nigeria, Westafrica. - UNESCO, UISG, Newsletter No. 3.
- PEARCE J.A., 1975: Basalt geochemistry used to investigated past tectonic environment on Cyprus. - *Tectonophysics*, 25, 41 - 67.
- PEARCE J.A., 1976: Statistical analysis of major element patterns in Basalts. - *J. Petrol*, 17, 15 - 43.
- PEARCE J.A., CANN J.R., 1973: Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analysis.-*Earth-planet. Sci. Let.*, 19, 290 - 300.
- PEARCE J.A., NORRY M.J., 1979: Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y and Nb variations in volcanic rocks. - *Contrib. Mineral. Petrol.*, 69, 33 - 47.
- PEARCE T.H., GORMAN B.E., BIRKETT T.C. 1975: The  $TiO_2 - K_2O - P_2O_5$  - Diagramm : A method of discriminating between oceanic and non-oceanic basalts. - *Earth Planet. Sci. Let.*, 24, 419 - 426.
- RAHAMAN M.A., 1976: Review of the Basement Geology of South-Western Nigeria. - In Kogbe, C.A. (ed), *Geology of Nigeria*, Elizabethan Publ. Comp.
- RINGWOOD A.E., 1975: Composition and petrology of the earth's mantle. - Mc Graw - Hill Book Company, New York.
- RINGWOOD A.E., ESSENE E., 1970: Petrogenesis of Apollo 11 basalts, internal constitution and origin of the moon. - *Proceed. Apollo 11 Sci. Conf.*, Vol I, 769 - 799.
- RIVALENTI G., 1976: Geochemistry of metavulcanic amphibolites from South-West Greenland. - In B.F.Windley (ed.), *The early history of the earth*, J. Wiley & Sons, New York.
- RÖSLER H.J., LANGE H., 1976: *Geochemische Tabellen*. - Enke-Verlag, Stuttgart.
- RONOV A.B., MIGDISOU A.A., LOBACH-ZHUCHENKO S.B., 1977: Regional metamorphism and sediment composition evolution. - *Geochem. Int.*, 14, 90 - 112.
- SATO T., 1976: Origin of the green tuff metal province of Japan. - *Geol. Ass. Canada Spec. Paper*, 14.
- SAXENA S.K. et al., 1977: Moon- an albite depleted giant Skaergaard? - *Contrib. Mineral. Petrol.*, 60, 77 - 90.
- SCHNEIDER W., 1979: *Geologie und Geochemie der metasedimentären Abfolgen östlich von Ile-Ife/SW-Nigeria*. - Dissertation Universität München (in Vorbereitung).



- SCHROLL E., 1975: Analytische Geochemie, Band II. - Enke-Verlag, Stuttgart.
- STEPHENSON P.J., GRIFFIN T.J., 1976: Some long basaltic lava flows in north Queensland. - in Volcanism in Australia, Elsevier Scientific Publishing Company.
- STRASSER-KING V.E.H., 1980: Mineral deposits associated with the precambrian of Sierra Leone. - Int. Geol. Correl. Progr., 4 th Conf., Projekt 108/144.
- TRÖGER W.E., 1969: Optische Bestimmung der gesteinsbildenden Minerale - Teil 2, Textband. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung.
- UREY J.G., CRAIG H., 1953: The composition of the stone meteorites and the origin of meteorites. - Geochim. Cosmochim. Acta, 4, 36 - 82.
- VILJOEN R.P., VILJOEN M.J., 1969: The geological and geochemical significance of the upper formations of the Onverwacht Group. - Geol. Soc. S. Africa Spec. Publ., 2, 113 - 51.
- VILJOEN R.P., VILJOEN M.J., 1971: The geological and geochemical evolution of the Onverwacht volcanic group of the Barberton Mountain Land, South Africa. - Spec. Publ. Geol Soc. Aust. 3, 133 - 149.
- WAGNER B.M., 1976: Geologische und geochemische Untersuchungen im oberen Pfitschtal. - unveröff. Dipl. Arb. Univ. München.
- WALKER J.C.G., 1977: Origin of the atmosphere: History of the release of volatiles from the solid earth. - in C. Ponnampetuma (editor): Chemical evolution of the early precambrian, Academic Press, New York.
- WASHINGTON H.S., 1917: Chemical analyses of igneous rocks. - U.S. Geol. Survey. Prof. Paper 99.
- WEBER-DIEFENBACH K. 1979: Erfahrungen mit der energiedispersiven Röntgenfluoreszenzanalyse. - Fortschr. d. Mineralogie, 57, Beih. 1, 233 - 234.
- WEDEPOHL K.H., 1974: The contribution of geochemical data to assumptions about the origin of magmas from the mantle. - Fortschr. Mineral., 52, 2, 141 - 172.
- WILSON H.D.B., ANDREW P., MEXHAM R.L., RAMLAL K., 1965: Archean volcanism in the Canadian shield. - Can. Journ. Earth Sci. 2, 161 - 175.
- WINCHESTER J.A., FLOYD P.A., 1976: Geochemical magma type discrimination application to altered and metamorphosed basic igneous rocks. - Earth planet. Sci. Let., 28, pp. 459.



- WINKLER H.G.F., 1979: Petrogenesis of metamorphic rocks. - Springer Verlag, New York, 5 th edition.
- WRIGHT T.L., GROLLIER M.J., SWANSON D.A., 1973: Chemical variation related to the stratigraphy of the Columbia River Basalt. - Bull. Geol. Soc. Am., 24.
- WRIGHT J.B., 1970: Controls of mineralisation in the older and younger tin fields of Nigeria. - Econ. Geol., 65, 945 - 951.
- WRIGHT J.B., 1976: Fracture systems in Nigeria and initiation of fracture zones in the South Atlantic. - Tectonophysics, 34, T 43 - T 47.
- YEATS R.S., FORBES W.C., SCHEIDEGGER K.F., HEATH G.R., 1973: Core from a Cretaceous Basalt, Central Equatorial Pacific, Leg 16, DSDP.-Bull. Geol. Soc. Am., 84, 871 - 882.
- YODER H.S., 1976: Generation of Basaltic Magma. - National Academy of Sciences, Washington.



Tabelle 2

Durchschnittswerte und Variationsbereich der Hauptgesteinstypen des Amphibolitkomplexes (A = Talk-anthophyllitschiefer; B = Metapyroxenite; C = Apatit-Pyroxenite; D = Metagranodiorit; E = Amphibolite I; F = Amphibolite II; n = Probenanzahl)

|                                | A                        | B                        | C                        | D                        | E                        | F                        |
|--------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 50.89<br>(44.76 - 55.75) | 47.35<br>(41.94 - 49.55) | 44.07<br>(40.10 - 49.07) | 58.56<br>(49.86 - 63.60) | 46.64<br>(41.47 - 50.95) | 47.14<br>(43.12 - 52.59) |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 5.01<br>( 2.14 - 8.58)   | 7.83<br>( 4.98 - 13.82)  | 9.23<br>( 4.99 - 17.16)  | 12.17<br>( 6.29 - 18.20) | 15.02<br>(12.08 - 17.74) | 14.24<br>( 7.97 - 18.54) |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 12.82<br>( 5.70 - 25.14) | 14.85<br>( 7.56 - 23.21) | 11.75<br>( 6.25 - 15.66) | 7.29<br>( 3.30 - 11.67)  | 14.84<br>(10.52 - 19.53) | 13.86<br>( 8.95 - 16.77) |
| MgO                            | 26.10<br>(15.93 - 31.96) | 16.13<br>(10.71 - 21.40) | 7.67<br>( 3.17 - 15.22)  | 3.47<br>( 0.79 - 7.57)   | 6.88<br>( 3.06 - 10.35)  | 7.09<br>( 4.04 - 10.68)  |
| CaO                            | 0.82<br>( sp - 4.55)     | 9.67<br>( 4.53 - 16.37)  | 22.30<br>(16.77 - 26.96) | 9.23<br>( 1.58 - 19.27)  | 11.46<br>( 9.03 - 14.81) | 12.74<br>( 8.08 - 16.94) |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.07<br>( sp - 1.10)     | 1.21<br>( sp - 1.59)     | 0.88<br>( sp - 3.00)     | 3.83<br>( 1.61 - 6.17)   | 0.55<br>( sp - 1.38)     | 0.76<br>( 0.03 - 1.98)   |
| K <sub>2</sub> O               | 0.04<br>( sp - 0.06)     | 0.22<br>( 0.09 - 0.39)   | 0.29<br>( 0.11 - 0.50)   | 3.11<br>( 1.16 - 6.02)   | 0.30<br>( 0.18 - 0.50)   | 0.30<br>( 0.11 - 0.85)   |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.16<br>( 0.12 - 0.28)   | 0.77<br>( 0.15 - 1.31)   | 0.85<br>( 0.69 - 1.60)   | 0.41<br>( 0.17 - 0.92)   | 3.14<br>( 0.84 - 5.48)   | 2.23<br>( 0.88 - 6.73)   |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.03<br>( sp - 0.18)     | 0.12<br>( 0.06 - 0.29)   | 1.78<br>( 0.28 - 5.27)   | 1.36<br>( 0.06 - 3.33)   | 0.46<br>( 0.21 - 0.82)   | 0.42<br>( 0.13 - 1.34)   |
| MnO                            | 0.07<br>( sp - 0.13)     | 0.19<br>( 0.11 - 0.29)   | 0.24<br>( 0.15 - 0.50)   | 0.18<br>( 0.06 - 0.36)   | 0.24<br>( 0.13 - 0.36)   | 0.22<br>( 0.15 - 0.39)   |
| G.V.                           | 4.35                     | 1.77                     | 1.13                     | 0.34                     | 0.46                     | 0.61                     |
| SUM                            | 100.36                   | 100.11                   | 100.19                   | 99.95                    | 99.99                    | 99.61                    |



Tabelle 2, Fortsetzung

|    | A                     | B                     | C                    | D                     | E                  | F                   |
|----|-----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|--------------------|---------------------|
| V  | 105<br>( Sp - 260)    | 22<br>( Sp - 210)     | 109<br>( Sp - 200)   | 20<br>( Sp - 81)      | 398<br>( 64 - 700) | 289<br>( 120 - 730) |
| Cr | 1340<br>(1000 - 2030) | 1330<br>( 305 - 2860) | 148<br>( 84 - 210)   | 141<br>( 80 - 315)    | 375<br>( 46 - 970) | 210<br>( 120 - 460) |
| Ni | 1420<br>(1020 - 1890) | 430<br>( 130 - 890)   | 58<br>( 25 - 100)    | 41<br>( 21 - 72)      | 116<br>( 60 - 210) | 97<br>( 40 - 200)   |
| Cu | 31<br>( Sp - 135)     | 24<br>( Sp - 220)     | 23<br>( Sp - 82)     | 6<br>( Sp - 29)       | 81<br>( 8 - 400)   | 53<br>( 7 - 190)    |
| Zn | 160<br>( 18 - 385)    | 120<br>( 12 - 590)    | 77<br>( 28 - 255)    | 82<br>( 30 - 155)     | 143<br>( 52 - 220) | 103<br>( 38 - 310)  |
| Ga | 12<br>( 7 - 23)       | 14<br>( 10 - 18)      | 12<br>( 8 - 23)      | 13<br>( 5 - 21)       | 19<br>( 14 - 22)   | 21<br>( 15 - 36)    |
| Pb | 18<br>( Sp - 95)      | 63<br>( Sp - 630)     | 18<br>( Sp - 36)     | 37<br>( 21 - 57)      | 6<br>( Sp - 33)    | 15<br>( Sp - 34)    |
| Rb | 27<br>( 20 - 35)      | 24<br>( 18 - 28)      | 23<br>( 6 - 36)      | 77<br>( 34 - 130)     | 10<br>( 5 - 19)    | 23<br>( 17 - 27)    |
| Sr | Sp                    | 68<br>( Sp - 395)     | 565<br>( 255 - 1710) | 1287<br>( 510 - 2260) | 269<br>( 92 - 580) | 239<br>( 52 - 685)  |
| Y  | 22<br>( 13 - 35)      | 26<br>( 15 - 69)      | 28<br>( 17 - 87)     | 36<br>( 29 - 48)      | 34<br>( 11 - 75)   | 22<br>( 17 - 41)    |
| Zr | 69<br>( Sp - 135)     | 36<br>( Sp - 120)     | 151<br>( 58 - 460)   | 350<br>( 175 - 600)   | 207<br>( 75 - 420) | 68<br>( Sp - 185)   |
| n  | 12                    | 20                    | 16                   | 15                    | 30                 | 50                  |



Tabelle 4

Durchschnittszusammensetzungen der Amphibolite I und II im Vergleich zu archaischen und modernen Tholeiiten unterschiedlicher tektonischer Stellung (Oxide in %, Spurenelemente in ppm) nach CONDIE (1976). DAT = verarmte, archaische Tholeiite; EAT = angereicherte, archaische Tholeiite;

|                                | Amphibolite |       | Archean |       | Modern |       | calc-alkaline | continental |
|--------------------------------|-------------|-------|---------|-------|--------|-------|---------------|-------------|
|                                | I           | II    | DAT     | EAT   | rise   | arc   |               |             |
| SiO <sub>2</sub>               | 46.64       | 47.14 | 51.4    | 49.7  | 49.8   | 51.1  | 50.2          | 50.3        |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 15.02       | 14.24 | 14.8    | 14.9  | 16.0   | 16.1  | 17.7          | 14.3        |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 14.84       | 13.86 | 2.1     | 2.6   | 2.0    | 3.0   | 3.9           | 3.5         |
| FeO                            |             |       | 8.3     | 8.8   | 7.5    | 7.3   | 6.3           | 9.3         |
| MgO                            | 6.88        | 7.09  | 6.7     | 6.3   | 7.5    | 5.1   | 5.4           | 5.9         |
| CaO                            | 11.46       | 12.74 | 10.7    | 9.4   | 11.2   | 10.8  | 9.8           | 9.7         |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.55        | 0.76  | 2.7     | 2.1   | 2.8    | 2.0   | 2.7           | 2.5         |
| K <sub>2</sub> O               | 0.30        | 0.30  | 0.18    | 0.32  | 0.14   | 0.30  | 0.9           | 0.8         |
| TiO <sub>2</sub>               | 3.14        | 2.23  | 1.92    | 1.0   | 1.5    | 0.83  | 1.0           | 2.2         |
| Cr                             | 375         | 210   | 350     | 175   | 300    | 50    | 50            | 100         |
| Ni                             | 116         | 97    | 225     | 100   | 100    | 25    | 50            | 100         |
| Cu                             | 81          | 53    | 110     | 110   | 70     | 80    | 80            | 100         |
| Zn                             | 143         | 103   | 115     | 100   | 75     | 80    | 80            | 90          |
| Rb                             | 10          | 23    | 4       | 10    | 1      | 5     | 10            | 30          |
| Str                            | 269         | 239   | 100     | 165   | 135    | 225   | 300           | 350         |
| Y                              | 34          | 22    | 10      | 15    | 30     | 20    | 23            | 30          |
| Zr                             | 207         | 68    | 55      | 100   | 100    | 60    | 100           | 200         |
| Rb/Sr                          | 0.037       | 0.096 | 0.040   | 0.061 | 0.0074 | 0.022 | 0.033         | 0.085       |

+ Gesamtisen als Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



## Erläuterungen zu den Analysentabellen

Die Elementoxide, Summe, Glühverlust und  $\text{H}_2\text{O}^-$  sind in Gewichtsprozent angegeben; die Spurenelemente in ppm.

Gesamteisen als  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ;

### Abkürzungen:

Sum = Summe, G.V. = Glühverlust,  $\text{H}_2\text{O}^-$  = Haftwasser, Sp = Spuren,

### Gesteinsbezeichnungen:

TA = Talk-Anthophyllitschiefer

MP = Metapyroxenit

A1 = Amphibolit I

A2 = Amphibolit II

AP = Apatit-Pyroxenit

MG = Metagranodiorit

MGh = Metagranodiorit, hornblendereich

G = Granit

P = Pegmatit

BG = Biotitgneis, Muskovit-Biotit-Gneis

HG = Epidot-Hornblende-Gneis

HE = Hornblende-Epidot-Schiefer

CG = Chloritgneis

GG = Granatgneis

Gm = Gneis, migmatisiert

Q = Quarzit

GQ = Glimmerquarzit

HQ = Hornblendequarzit

M = Metasedimente, undifferenziert

w = stark verwittert



| Nr                             | 1     | 2     | 3     | 4     | 5      | 6      | 7      | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13     | 14    |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
| Typ                            | G     | G     | G     | G     | G      | G      | G      | Mw    | Mw    | TA    | HQ    | TA    | AP     | Q     |
| SiO <sub>2</sub>               | 73.88 | 74.62 | 73.64 | 72.02 | 73.18  | 74.09  | 74.54  | 54.02 | 49.06 | 49.25 | 88.71 | 54.73 | 49.35  | 95.42 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 14.40 | 14.39 | 14.40 | 14.50 | 14.90  | 14.69  | 14.59  | 21.15 | 23.07 | 8.58  | 1.13  | 2.23  | 11.56  | 2.20  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1.34  | 1.12  | 1.24  | 1.35  | 1.19   | 1.14   | 1.10   | 12.30 | 15.47 | 10.59 | 2.72  | 7.67  | 10.03  | SP    |
| MgO                            | 0.11  | 0.07  | 0.18  | 0.22  | 0.07   | 0.04   | 0.04   | 0.05  | 0.75  | 23.27 | 2.09  | 29.87 | 12.53  | 0.40  |
| CaO                            | 1.04  | 0.98  | 1.05  | 1.11  | 1.03   | 0.95   | 0.91   | SP    | SP    | 0.56  | 1.64  | SP    | 15.04  | 0.03  |
| Na <sub>2</sub> O              | 2.86  | 2.58  | 3.35  | 4.30  | 3.25   | 2.87   | 2.72   | SP    | SP    | SP    | 0.63  | SP    | SP     | 0.14  |
| K <sub>2</sub> O               | 4.98  | 4.96  | 5.09  | 5.64  | 5.45   | 5.30   | 5.11   | 1.34  | 1.05  | 0.02  | 1.06  | SP    | 0.16   | 1.13  |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.18  | 0.12  | 0.17  | 0.17  | 0.16   | 0.15   | 0.15   | 1.25  | 1.40  | 0.12  | 0.19  | 0.20  | 0.72   | 0.18  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.13  | 0.14  | 0.15  | 0.18  | 0.16   | 0.15   | 0.14   | 0.09  | 0.06  | 0.02  | 0.29  | 0.10  | 0.45   | 0.08  |
| MnO                            | 0.02  | 0.01  | 0.02  | 0.02  | 0.02   | 0.02   | 0.02   | 0.01  | 0.60  | 0.09  | 0.08  | 0.04  | 0.11   | 0.01  |
| G.V.                           | 0.64  | 0.69  | 0.62  | 0.46  | 0.60   | 0.66   | 0.68   | 9.77  | 8.68  | 5.90  | 0.14  | 4.92  | 0.59   | 0.23  |
| SUM                            | 99.58 | 99.73 | 99.91 | 99.97 | 100.01 | 100.06 | 100.00 | 99.98 | 99.64 | 98.14 | 98.68 | 99.46 | 100.54 | 99.62 |
| H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>  | 0.33  | 0.12  | 0.11  | 0.08  | 0.11   | 0.21   | 0.13   | 1.68  | 1.68  | 0.68  | 0.08  | 0.19  | 0.11   |       |
| V                              | 24    | 13    | 18    | 22    | 11     | 9      | 3      | 110   | 115   | SP    | 47    | SP    | 100    | 70    |
| Cr                             | Sp    | 13    | Sp    | Sp    | 8      | 10     | 23     | 285   | 395   | 1000  | 75    | 1410  | 120    | 10    |
| Ni                             | 16    | 19    | 8     | 9     | 6      | 12     | 17     | 78    | 100   | 1000  | 28    | 1130  | 40     | 21    |
| Cu                             | 13    | 25    | 17    | 19    | 21     | 16     | 20     | 31    | 32    | SP    | 14    | 10    | 12     | 17    |
| Zn                             | 53    | 61    | 71    | 66    | 64     | 73     | 67     | 25    | 24    | 210   | 3     | 73    | 80     | 89    |
| Ga                             | 25    | 32    | 24    | 22    | 18     | 28     | 26     | 31    | 33    | 14    | 18    | 10    | 18     | 11    |
| Pb                             | 14    | 19    | 23    | 22    | 22     | 26     | 21     | 47    | 105   | 25    | 20    | 11    | 22     | 51    |
| Rb                             | 335   | 330   | 350   | 355   | 345    | 355    | 350    | 62    | 44    | 28    | 34    | 35    | 41     | 37    |
| Str                            | 115   | 110   | 115   | 125   | 125    | 120    | 111    | SP    | SP    | SP    | SP    | SP    | 310    | SP    |
| Y                              | 53    | 53    | 55    | 55    | 55     | 56     | 57     | 30    | 24    | 23    | 29    | 28    | 21     | 32    |
| Zr                             | 240   | 240   | 240   | 245   | 250    | 255    | 245    | 165   | 100   | 50    | 135   | 105   | 19     | 165   |



| №                              | 15     | 16     | 17     | 18     | 19    | 20    | 21     | 22    | 23     | 24     | 25    | 26    | 27    | 28     |
|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|--------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|
| Typ                            | BG     | BG     | BG     | BG     | BG    | BG    | BG     | A2    | BGw    | BGw    | Q     | Q     | GQ    | GQ     |
| SiO <sub>2</sub>               | 79.21  | 73.87  | 70.38  | 79.43  | 68.12 | 67.98 | 78.22  | 48.62 | 74.14  | 67.56  | 93.16 | 93.37 | 77.43 | 77.76  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 8.27   | 12.73  | 14.31  | 12.08  | 14.30 | 16.70 | 15.27  | 15.65 | 14.89  | 16.28  | 0.77  | 3.01  | 14.39 | 14.89  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 5.25   | 4.06   | 5.14   | 1.41   | 6.38  | 7.88  | 0.91   | 8.62  | 2.92   | 6.91   | 3.12  | 1.14  | 1.42  | 1.38   |
| MgO                            | 1.72   | 1.07   | 1.39   | 0.15   | 1.83  | 2.43  | Sp     | 6.40  | 0.59   | 0.89   | 0.34  | 0.39  | Sp    | 0.06   |
| CaO                            | 0.81   | 1.51   | 1.50   | 0.85   | 0.86  | 0.32  | 0.08   | 15.34 | 0.64   | 0.05   | 0.01  | Sp    | 0.71  | 0.09   |
| Na <sub>2</sub> O              | 1.04   | 1.50   | 1.49   | 0.51   | 0.94  | 0.76  | Sp     | Sp    | 0.20   | 0.36   | 0.22  | 0.14  | 0.62  | Sp     |
| K <sub>2</sub> O               | 2.39   | 4.25   | 4.42   | 4.14   | 3.49  | 0.15  | 4.17   | 0.27  | 4.50   | 5.25   | 1.08  | 1.04  | 3.18  | 4.22   |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.88   | 0.48   | 0.70   | 0.17   | 0.85  | 1.02  | 0.03   | 2.65  | 0.35   | 0.83   | 0.29  | 0.17  | 0.11  | 0.06   |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.24   | 0.19   | 0.25   | 0.09   | 0.20  | 0.30  | 0.05   | 0.38  | 0.17   | 0.14   | 0.20  | 0.13  | 0.01  | Sp     |
| MnO                            | 0.07   | 0.07   | 0.07   | 0.02   | 0.04  | 0.05  | 0.15   | 0.27  | 0.02   | 0.10   | 0.02  | 0.01  | 0.03  | 0.02   |
| G.V.                           | 0.63   | 0.64   | 0.86   | 1.41   | 2.40  | 1.48  | 1.82   | 0.41  | 1.78   | 2.29   | 0.26  | 0.51  | 1.19  | 1.74   |
| SUM                            | 100.52 | 100.37 | 100.51 | 100.26 | 99.46 | 99.07 | 100.70 | 98.61 | 100.22 | 100.66 | 99.37 | 99.91 | 99.09 | 100.52 |
| H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>  | 0.10   | 0.14   | 0.10   | 0.52   | 1.09  | 0.09  | 0.05   | 0.08  | 0.21   | 0.25   | 0.05  | 0.15  | 0.12  | 0.14   |
| V                              | 75     | 53     | 100    | Sp     | 112   | 117   | Sp     | 225   | 46     | 92     | 105   | 98    | 11    | 11     |
| Cr                             | 86     | 49     | 35     | 28     | 36    | 54    | Sp     | 255   | 13     | 53     | 29    | 25    | Sp    | Sp     |
| Ni                             | 46     | 30     | 31     | 19     | 22    | 30    | 16     | 125   | 16     | 23     | 24    | 28    | 23    | 18     |
| Cu                             | 20     | 22     | 14     | 35     | 25    | 30    | 40     | 31    | 20     | 15     | 32    | 26    | 15    | 16     |
| Zn                             | 68     | 45     | 53     | 28     | 76    | 91    | 180    | 135   | 33     | 86     | Sp    | 93    | 32    | 20     |
| Ga                             | 19     | 15     | 16     | 14     | 18    | 38    | 38     | 26    | 14     | 17     | 15    | 12    | 17    | 19     |
| Pb                             | 13     | 18     | 20     | 22     | 22    | 26    | 19     | 3     | 19     | 25     | 115   | 70    | 23    | 13     |
| Rb                             | 130    | 140    | 160    | 125    | 130   | 52    | 640    | 26    | 170    | 190    | 38    | 33    | 150   | 205    |
| Sr                             | 96     | 140    | 110    | 175    | 51    | 147   | 42     | 750   | 76     | 6      | Sp    | Sp    | 106   | 32     |
| Y                              | 41     | 48     | 49     | 54     | 46    | 36    | 79     | 24    | 56     | 46     | 29    | 30    | 58    | 55     |
| Zr                             | 365    | 260    | 260    | 285    | 245   | 243   | 235    | 205   | 265    | 240    | 250   | 175   | 270   | 220    |



| Nr                             | 29     | 30     | 31    | 32     | 33    | 34    | 35    | 36     | 37     | 38     | 39    | 40    | 41    | 42     |
|--------------------------------|--------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|
| Typ                            | A2     | TA     | TA    | A2     | A2    | MP    | A2    | A2     | A2     | A2     | A2    | A2    | AP    | A2     |
| SiO <sub>2</sub>               | 45.69  | 55.75  | 52.80 | 44.56  | 45.51 | 46.77 | 45.67 | 45.09  | 46.95  | 48.82  | 47.86 | 43.40 | 46.27 | 52.59  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 19.87  | 2.14   | 4.02  | 13.11  | 13.99 | 12.78 | 15.65 | 16.01  | 15.31  | 14.15  | 11.30 | 14.47 | 9.61  | 13.71  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 17.13  | 5.70   | 6.74  | 16.77  | 15.93 | 11.66 | 15.52 | 11.43  | 14.17  | 11.86  | 13.97 | 14.90 | 12.62 | 14.81  |
| MgO                            | 7.54   | 31.96  | 30.08 | 8.02   | 7.15  | 11.58 | 4.04  | 9.67   | 5.00   | 7.48   | 6.32  | 5.42  | 9.13  | 6.98   |
| CaO                            | 11.60  | Sp     | Sp    | 13.01  | 13.75 | 13.09 | 11.82 | 14.90  | 12.24  | 11.86  | 16.20 | 16.94 | 18.44 | 8.08   |
| Na <sub>2</sub> O              | 1.67   | Sp     | Sp    | 0.17   | 0.74  | 0.85  | 0.18  | 0.74   | 1.20   | 1.51   | 1.10  | 0.24  | 0.07  | 0.60   |
| K <sub>2</sub> O               | 0.42   | Sp     | Sp    | 0.40   | 0.31  | 0.23  | 0.21  | 0.25   | 0.39   | 0.32   | 0.35  | 0.50  | 0.22  | 0.16   |
| TiO <sub>2</sub>               | 1.77   | 0.20   | 0.18  | 2.07   | 1.94  | 1.01  | 4.38  | 1.17   | 3.75   | 1.91   | 1.11  | 2.42  | 1.33  | 2.59   |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.33   | 0.10   | 0.09  | 0.24   | 0.31  | 0.20  | 0.66  | 0.20   | 0.75   | 0.26   | 0.25  | 0.39  | 0.28  | 0.33   |
| MnO                            | 0.21   | Sp     | 0.04  | 0.25   | 0.20  | 0.16  | 0.23  | 0.15   | 0.21   | 0.20   | 0.22  | 0.19  | 0.20  | 0.20   |
| G.V.                           | 1.29   | 5.03   | 6.17  | 0.53   | 0.81  | 0.74  | 0.29  | 0.51   | 0.47   | 0.58   | 0.81  | 0.88  | 0.80  | 0.20   |
| SUM                            | 100.52 | 100.63 | 99.13 | 100.53 | 99.55 | 99.24 | 98.67 | 100.12 | 100.39 | 100.53 | 99.50 | 99.75 | 98.97 | 100.25 |
| H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>  | 0.38   | 0.16   | 0.41  | 0.14   | 0.37  | 0.19  | 0.13  | 0.04   | 0.17   | 0.15   | 0.21  | 0.14  | 0.19  | 0.12   |
| V                              | 365    | 420    | 360   | 270    | 250   | 4     | 520   | 105    | 420    | 270    | 125   | 360   | 160   | 335    |
| Cr                             | 90     | 1220   | 1230  | 220    | 200   | 420   | 280   | 240    | 285    | 165    | 265   | 210   | 160   | 280    |
| Ni                             | 54     | 1890   | 1820  | 74     | 69    | 185   | 100   | 135    | 87     | 100    | 135   | 78    | 61    | 130    |
| Cu                             | 84     | 67     | 67    | 63     | 42    | 84    | 92    | 95     | 97     | 18     | 18    | 71    | 19    | 20     |
| Zn                             | 160    | 52     | 48    | 135    | 110   | 100   | 170   | 69     | 110    | 125    | 105   | 94    | 79    | 135    |
| Ga                             | 21     | 7      | 7     | 19     | 19    | 17    | 35    | 17     | 29     | 20     | 17    | 22    | 16    | 26     |
| Pb                             | 41     | 8      | 10    | 27     | 24    | 24    | Sp    | 19     | 3      | 21     | 24    | 10    | 18    | 11     |
| Rb                             | 26     | 32     | 34    | 21     | 24    | 25    | 21    | 25     | 22     | 24     | 24    | 21    | 24    | 23     |
| Sr                             | 32     | Sp     | Sp    | 52     | 80    | 110   | 160   | 235    | 220    | 230    | 260   | 370   | 470   | 84     |
| Y                              | 30     | 29     | 28    | 21     | 22    | 19    | 28    | 19     | 20     | 20     | 18    | 17    | 18    | 20     |
| Zr                             | 6      | 135    | 120   | Sp     | Sp    | 32    | 94    | 57     | 130    | 49     | 35    | 58    | 95    | 54     |



Profil A

| Nr                                                                                          | 43    | 44    | 45    | 46    | 47    | 48    | 49    | 50    | 51    | 52     | 53    | 54    | 55     | 56     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|--------|
| Typ                                                                                         | Q     | A2    | HG    | A2    | HG    | MP    | A2    | A2    | MP    | A2     | MP    | A2    | Q      | A2     |
| SiO <sub>2</sub><br>Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub><br>Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub><br>MgO | 88.55 | 48.08 | 58.01 | 46.31 | 61.23 | 48.36 | 48.57 | 50.04 | 48.95 | 51.16  | 45.79 | 44.70 | 96.42  | 46.25  |
|                                                                                             | 1.63  | 16.25 | 12.23 | 15.42 | 15.12 | 8.09  | 14.70 | 15.24 | 7.06  | 13.34  | 11.80 | 7.97  | 1.15   | 14.61  |
|                                                                                             | 6.96  | 11.33 | 7.61  | 12.92 | 3.71  | 12.08 | 13.23 | 13.35 | 12.86 | 16.26  | 10.24 | 17.72 | 0.10   | 14.86  |
|                                                                                             | 0.94  | 7.33  | 6.90  | 8.14  | 2.78  | 14.91 | 6.74  | 7.72  | 14.99 | 4.54   | 11.72 | 7.37  | 0.28   | 5.57   |
| CeO                                                                                         | 0.01  | 13.20 | 7.02  | 12.06 | 6.23  | 12.12 | 12.37 | 9.59  | 11.48 | 8.58   | 15.59 | 14.64 | Sp     | 10.16  |
| Na <sub>2</sub> O                                                                           | 0.30  | 0.73  | 4.24  | 1.55  | 4.80  | 1.66  | 1.18  | 0.96  | 1.70  | 0.58   | 1.29  | 0.03  | 0.34   | 1.17   |
| K <sub>2</sub> O                                                                            | 1.00  | 0.16  | 0.95  | 0.23  | 4.47  | 0.16  | 0.32  | 0.17  | 0.16  | 0.49   | 0.49  | 0.35  | 1.04   | 0.39   |
| TiO <sub>2</sub>                                                                            | 0.23  | 1.74  | 0.78  | 1.96  | 0.27  | 0.62  | 1.19  | 1.37  | 0.68  | 3.82   | 0.59  | 3.25  | 0.20   | 5.73   |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>                                                               | 0.02  | 0.25  | 0.32  | 0.25  | 0.53  | 0.23  | 0.21  | 0.23  | 0.22  | 0.82   | 0.18  | 1.34  | 0.10   | 1.09   |
| MnO                                                                                         | 0.02  | 0.20  | 0.28  | 0.17  | 0.10  | 0.24  | 0.19  | 0.27  | 0.29  | 0.25   | 0.18  | 0.38  | 0.01   | 0.30   |
| G.V.                                                                                        | 0.20  | 0.36  | 0.62  | 0.84  | 0.36  | 0.78  | 0.69  | 0.20  | 1.00  | 0.97   | 0.97  | 0.93  | 0.18   | 0.49   |
| SUM                                                                                         | 99.56 | 98.63 | 98.96 | 99.85 | 99.60 | 99.25 | 99.37 | 99.13 | 99.39 | 100.81 | 98.84 | 98.68 | 100.62 | 100.62 |
| H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>                                                               | 0.11  | 0.24  | 0.40  | 0.25  | 0.33  | 0.20  | 0.18  | 0.14  | 0.27  | 0.41   | 0.41  | 0.22  | 0.11   | 0.17   |
| V                                                                                           | Sp    | 150   | 110   | 185   | Sp    | Sp    | 220   | 160   | Sp    | 570    | 10    | 260   | 76     | 730    |
| Cr                                                                                          | 165   | 220   | 76    | 310   | 71    | 1440  | 120   | 220   | 1600  | 320    | 300   | 320   | 15     | 290    |
| Ni                                                                                          | 41    | 90    | 65    | 110   | 31    | 215   | 64    | 74    | 225   | 105    | 145   | 75    | 28     | 97     |
| Cu                                                                                          | 31    | 20    | 285   | 39    | 57    | Sp    | 34    | 7     | Sp    | 87     | 25    | 24    | 47     | 56     |
| Zn                                                                                          | Sp    | 95    | 145   | 78    | 29    | 165   | 96    | 175   | 235   | 150    | 69    | 335   | 99     | 205    |
| Ga                                                                                          | 18    | 22    | 14    | 19    | 11    | 18    | 17    | 19    | 15    | 26     | 11    | 26    | 14     | 36     |
| Pb                                                                                          | 27    | 17    | 22    | 12    | 22    | 15    | 27    | 34    | 13    | 2      | 20    | 15    | 36     | Sp     |
| Rb                                                                                          | 40    | 27    | 38    | 23    | 66    | 24    | 23    | 23    | 27    | 24     | 28    | 20    | 23     | 33     |
| Sr                                                                                          | Sp    | 350   | 270   | 275   | 790   | Sp    | 170   | 170   | Sp    | 95     | 125   | 685   | Sp     | 205    |
| Y                                                                                           | 39    | 21    | 32    | 21    | 34    | 22    | 20    | 22    | 21    | 30     | 19    | 41    | 31     | 22     |
| Zr                                                                                          | 265   | 90    | 200   | 57    | 305   | 13    | 14    | 36    | Sp    | 115    | 24    | 185   | 175    | 105    |



## Profil A

| №                              | 57    | 58     | 59    | 60    | 61    | 62    | 63     | 64    | 65    | 66     | 67    | 68    | 69    | 70    |
|--------------------------------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|
| Typ                            | A2    | Q      | A2    | A2    | A2    | MP    | BG     | MP    | HG    | BGw    | MP    | HG    | A2    | TA    |
| SiO <sub>2</sub>               | 41.48 | 95.41  | 47.33 | 46.81 | 43.18 | 48.47 | 78.16  | 44.35 | 46.73 | 67.60  | 48.00 | 55.24 | 48.39 | 47.71 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 13.65 | 0.29   | 14.75 | 14.58 | 13.14 | 7.80  | 11.97  | 10.75 | 17.16 | 15.53  | 5.97  | 14.99 | 14.35 | 6.70  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 12.73 | 1.86   | 10.81 | 12.79 | 11.61 | 12.74 | 1.87   | 15.73 | 11.18 | 9.19   | 13.42 | 8.03  | 14.15 | 13.15 |
| MgO                            | 5.37  | 0.39   | 9.28  | 8.30  | 8.00  | 13.54 | 0.45   | 6.64  | 3.17  | 0.03   | 22.67 | 3.14  | 6.73  | 20.72 |
| CaO                            | 19.26 | Sp     | 13.57 | 13.25 | 18.94 | 12.57 | 0.75   | 14.57 | 16.78 | Sp     | 4.55  | 13.85 | 11.96 | 7.33  |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.81  | 0.15   | 0.87  | 1.39  | 0.29  | 1.44  | 0.86   | 0.41  | 0.02  | Sp     | Sp    | Sp    | 1.14  | Sp    |
| K <sub>2</sub> O               | 0.28  | 1.06   | 0.22  | 0.24  | 0.13  | 0.24  | 5.73   | 0.85  | 0.21  | 2.82   | 0.08  | 1.23  | 0.31  | 0.09  |
| TiO <sub>2</sub>               | 2.99  | 0.50   | 0.93  | 1.13  | 1.86  | 0.76  | 0.19   | 4.15  | 1.17  | 1.69   | 0.33  | 1.30  | 1.57  | 0.48  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.74  | 0.12   | 0.23  | 0.21  | 0.26  | 0.22  | 0.17   | 1.07  | 0.44  | 0.13   | 0.07  | 0.23  | 0.28  | 0.09  |
| MnO                            | 0.26  | 0.02   | 0.16  | 0.16  | 0.24  | 0.20  | 0.03   | 0.39  | 0.16  | 0.05   | 0.13  | 0.14  | 0.18  | 0.14  |
| G.V.                           | 1.32  | 0.24   | 0.56  | 0.45  | 1.17  | 1.53  | 0.64   | 0.74  | 2.41  | 3.45   | 3.68  | 1.17  | 0.59  | 3.24  |
| SUM                            | 99.89 | 100.04 | 98.70 | 99.31 | 98.82 | 99.51 | 100.82 | 99.65 | 99.43 | 100.49 | 98.90 | 99.31 | 99.65 | 99.66 |
| H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>  | 0.31  | 0.05   | 0.09  | 0.09  | 0.47  | 0.44  | 0.10   | 0.10  | 0.73  | 0.35   | 0.43  | 0.52  | 0.14  | 0.53  |
| V                              | 170   | Sp     | 185   | 250   | 80    | Sp    | Sp     | 380   | 90    | 191    | Sp    | 145   | 280   | Sp    |
| Cr                             | 500   | 155    | 190   | 110   | 470   | 1060  | 57     | 350   | 210   | 155    | 2250  | 35    | 150   | 2430  |
| Ni                             | 200   | 51     | 145   | 105   | 240   | 275   | 27     | 115   | 75    | 63     | 1020  | 46    | 90    | 760   |
| Cu                             | 25    | 31     | 12    | 65    | 3     | 8     | 17     | 23    | 22    | 31     | Sp    | 6     | 105   | Sp    |
| Zn                             | 120   | Sp     | 82    | 80    | 115   | 82    | 25     | 310   | 68    | 63     | 155   | 100   | 84    | 130   |
| Ga                             | 23    | 20     | 17    | 17    | 18    | 13    | 14     | 28    | 21    | 23     | 14    | 17    | 18    | 13    |
| Pb                             | 7     | 22     | 24    | 24    | 12    | 14    | 12     | 5     | 36    | 9      | 13    | 43    | 18    | 15    |
| Rb                             | 23    | 36     | 26    | 23    | 23    | 26    | 170    | 22    | 75    | 75     | 25    | 37    | 20    | 23    |
| Sr                             | 1050  | Sp     | 265   | 155   | 830   | 52    | 130    | 640   | 1040  | 21     | Sp    | 700   | 140   | Sp    |
| Y                              | 24    | 32     | 21    | 20    | 22    | 21    | 51     | 28    | 28    | 36     | 35    | 38    | 22    | 42    |
| Zr                             | 285   | 280    | 71    | 40    | 250   | 23    | 275    | 150   | 310   | 345    | 31    | 230   | 41    | 33    |



| NE                             | 71    | 72    | 73    | 74    | 75    | 76    | 77     | 78     | 79     | 80     | 81    | 82    | 83    | 84    |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
| Typ                            | A2    | HG    | A2    | A2    | MG    | MP    | A2     | MP     | A2     | A2     | HG    | HE    | HE    | MP    |
| SiO <sub>2</sub>               | 49.13 | 65.15 | 49.72 | 49.36 | 60.37 | 47.67 | 47.84  | 45.95  | 47.05  | 47.90  | 63.69 | 53.72 | 32.61 | 49.55 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 14.21 | 17.22 | 14.90 | 14.04 | 13.73 | 6.10  | 13.97  | 5.88   | 14.44  | 14.85  | 18.20 | 9.19  | 9.02  | 6.66  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 13.76 | 7.82  | 10.84 | 14.25 | 5.61  | 22.33 | 15.97  | 27.27  | 15.01  | 14.75  | 2.28  | 8.28  | 36.44 | 10.90 |
| MgO                            | 7.13  | 4.37  | 8.98  | 6.66  | 3.35  | 14.52 | 6.66   | 16.03  | 7.07   | 6.23   | 0.76  | 3.70  | 4.28  | 14.19 |
| CaO                            | 11.93 | 0.52  | 12.97 | 11.13 | 6.30  | 5.85  | 10.06  | 0.51   | 11.86  | 10.14  | 1.65  | 12.71 | 11.28 | 12.54 |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.91  | 0.71  | 0.06  | 1.16  | 5.08  | 1.13  | 1.31   | 0.33   | 0.82   | 1.98   | 6.17  | Sp    | 0.60  | 1.59  |
| K <sub>2</sub> O               | 0.31  | Sp    | 0.19  | 0.26  | 3.83  | 0.15  | 0.35   | 0.06   | 0.32   | 0.33   | 6.02  | 3.93  | 0.23  | 0.28  |
| TiO <sub>2</sub>               | 1.49  | 1.03  | 1.00  | 1.53  | 0.28  | 0.29  | 2.88   | 0.18   | 2.57   | 2.46   | 0.45  | 0.36  | 2.91  | 0.64  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.25  | 0.07  | 0.24  | 0.28  | 0.60  | 0.07  | 0.40   | 0.05   | 0.35   | 0.27   | 0.06  | 6.45  | 0.91  | 0.52  |
| MnO                            | 0.16  | 0.04  | 0.15  | 0.21  | 0.14  | 0.11  | 0.21   | 0.06   | 0.28   | 0.24   | 0.06  | 0.24  | 0.49  | 0.19  |
| G.V.                           | 0.50  | 0.76  | 0.28  | 0.56  | 0.32  | 1.59  | 0.72   | 3.72   | 0.52   | 0.96   | 0.35  | 0.41  | 0.63  | 1.15  |
| SUM                            | 99.78 | 97.69 | 99.31 | 99.45 | 99.61 | 99.81 | 100.42 | 100.04 | 100.29 | 100.11 | 99.69 | 98.99 | 98.40 | 98.21 |
| H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>  | 0.11  | 0.08  | 0.11  | 0.14  | 0.14  | 0.48  | 0.26   | 0.98   | 0.13   | 0.28   | 0.22  | 0.60  | 0.72  | 0.25  |
| V                              | 305   | 110   | 210   | 310   | 16    | 125   | 373    | 99     | 385    | 450    | Sp    | Sp    | 500   | Sp    |
| Cr                             | 105   | 135   | 89    | 105   | 100   | 395   | 255    | 560    | 210    | 135    | 240   | 125   | 750   | 870   |
| Ni                             | 88    | 83    | 105   | 81    | 48    | 205   | 84     | 275    | 96     | 86     | 69    | 49    | 110   | 225   |
| Cu                             | 45    | 46    | 27    | 18    | 8     | 10    | 53     | 45     | 275    | 24     | 29    | Sp    | 9     | Sp    |
| Zn                             | 86    | 58    | 71    | 125   | 65    | 310   | 165    | 385    | 170    | 155    | 30    | 72    | 440   | 110   |
| Ga                             | 15    | 22    | 15    | 18    | 15    | 13    | 22     | 23     | 20     | 22     | 16    | 13    | 36    | 12    |
| Pb                             | 21    | 28    | 25    | 28    | 27    | 74    | 13     | 415    | 13     | 13     | 32    | 32    | 380   | 14    |
| Rb                             | 23    | 31    | 22    | 22    | 83    | 26    | 19     | 21     | 21     | 22     | 130   | 69    | 16    | 27    |
| Sr                             | 180   | 960   | 215   | 225   | 920   | Sp    | 105    | Sp     | 125    | 64     | 2260  | 1660  | 780   | 395   |
| Y                              | 21    | 26    | 22    | 22    | 31    | 18    | 25     | 13     | 20     | 21     | 40    | 31    | 20    | 22    |
| Zr                             | 47    | 285   | 62    | 64    | 250   | Sp    | 35     | Sp     | 31     | 19     | 600   | 480   | 24    | 120   |



Profil A

Profil B

| Nr                             | 85    | 1     | 2     | 3     | 4      | 5     | 6     | 7      | 8      | 9     | 10    | 11     |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|--------|
| Typ                            | HG    | AP    | AP    | AP    | AP     | AP    | AP    | AP     | P      | AP    | AP    | AP     |
| SiO <sub>2</sub>               | 57.59 | 45.76 | 48.75 | 46.09 | 45.39  | 42.79 | 44.48 | 40.94  | 75.61  | 45.51 | 44.38 | 41.13  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 14.63 | 9.19  | 17.58 | 8.73  | 8.47   | 10.01 | 1.59  | 7.87   | 13.74  | 8.96  | 8.44  | 9.78   |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 8.62  | 11.36 | 9.85  | 10.99 | 10.55  | 12.37 | 11.48 | 15.66  | 1.00   | 10.56 | 10.09 | 15.19  |
| MgO                            | 1.75  | 8.91  | 3.26  | 9.27  | 12.03  | 9.45  | 8.98  | 6.90   | Sp     | 9.03  | 9.64  | 8.46   |
| CaO                            | 12.02 | 19.54 | 17.25 | 20.72 | 21.52  | 21.60 | 21.05 | 25.61  | 0.46   | 21.32 | 22.12 | 22.02  |
| Na <sub>2</sub> O              | Sp    | 1.20  | 0.01  | 0.92  | 0.33   | 0.64  | 1.20  | Sp     | 3.87   | 1.13  | 0.92  | 0.67   |
| K <sub>2</sub> O               | 0.17  | 0.38  | 0.24  | 0.24  | 0.41   | 0.20  | 0.19  | 0.42   | 4.68   | 0.15  | 0.26  | 0.37   |
| TiO <sub>2</sub>               | 1.15  | 0.99  | 0.93  | 0.90  | 0.56   | 1.20  | 1.05  | 1.01   | 0.01   | 0.90  | 0.69  | 1.12   |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.21  | 0.22  | 0.39  | 0.15  | 0.19   | 0.43  | 0.20  | 2.14   | 0.13   | 0.16  | 0.19  | 0.69   |
| MnO                            | 0.10  | 0.24  | 0.15  | 0.24  | 0.19   | 0.23  | 0.22  | 0.23   | 0.16   | 0.22  | 0.21  | 0.25   |
| G.V.                           | 2.91  | 0.74  | 0.52  | 0.61  | 0.80   | 0.33  | 0.75  | 0.89   | 0.56   | 0.82  | 1.27  | 1.13   |
| SUM                            | 99.15 | 99.05 | 98.93 | 99.15 | 100.44 | 99.25 | 99.40 | 101.67 | 100.43 | 98.76 | 98.71 | 100.84 |
| H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>  | 0.59  | 0.19  | 0.37  | 0.29  | 0.31   | 0.26  | 0.21  | 0.19   |        | 0.06  | 0.15  | 0.33   |
| V                              | 87    | 140   | 110   | 115   | 110    | 100   | 150   | 110    | Sp     | 110   | 100   | 195    |
| Cr                             | 225   | 125   | 150   | 135   | 120    | 200   | 135   | 175    | Sp     | 145   | 120   | 110    |
| Ni                             | 85    | 57    | 70    | 53    | 100    | 70    | 56    | 67     | 20     | 48    | 55    | 70     |
| Cu                             | 7     | 18    | 5     | 15    | 80     | 40    | 25    | 82     | 39     | 13    | 15    | 14     |
| Zn                             | 51    | 73    | 60    | 77    | 51     | 60    | 62    | 57     | 93     | 53    | 57    | 72     |
| Ga                             | 17    | 13    | 21    | 11    | 8      | 12    | 13    | 10     | 18     | 11    | 10    | 12     |
| Pb                             | 17    | 15    | 28    | 15    | 17     | 16    | 12    | 14     | 14     | 11    | 14    | 17     |
| Rb                             | 30    | 29    | 25    | 35    | 40     | 21    | 26    | 23     | 480    | 22    | 26    | 21     |
| Sr                             | 740   | 315   | 660   | 290   | 340    | 320   | 295   | 480    | 165    | 305   | 345   | 470    |
| Y                              | 26    | 22    | 21    | 22    | 21     | 19    | 19    | 22     | 63     | 20    | 20    | 18     |
| Zr                             | 230   | 140   | 130   | 125   | 80     | 75    | 100   | 150    | 205    | 120   | 120   | 125    |



Profil 8

| Nr                             | 12     | 13     | 14    | 15    | 16    | 17    | 18    | 19    | 20    | 21    | 22    | 23    | 24    | 25    |
|--------------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Typ                            | P      | AP     | HQ    | A2    | AP    | HG    | A2    | HG    | HQ    | A2    | A2    | A2    | A2    | MP    |
| SiO <sub>2</sub>               | 77.64  | 42.05  | 78.09 | 46.97 | 46.52 | 56.86 | 45.46 | 62.25 | 86.57 | 48.23 | 46.99 | 46.99 | 46.68 | 48.87 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 13.49  | 9.10   | 7.18  | 16.90 | 12.05 | 12.51 | 14.33 | 13.91 | 3.84  | 14.49 | 14.36 | 17.40 | 13.41 | 4.98  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1.38   | 12.60  | 2.96  | 12.08 | 9.16  | 5.93  | 16.11 | 5.63  | 2.08  | 14.32 | 14.47 | 13.03 | 14.14 | 23.21 |
| MgO                            | 0.40   | 6.84   | 1.38  | 8.19  | 5.41  | 5.21  | 6.76  | 2.46  | 0.92  | 6.98  | 7.88  | 9.22  | 9.25  | 15.86 |
| CaO                            | 0.26   | 24.94  | 3.71  | 11.51 | 20.27 | 10.81 | 11.27 | 5.64  | 1.98  | 11.12 | 11.43 | 10.29 | 12.17 | 4.53  |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.34   | Sp     | 4.16  | 0.58  | 1.44  | 3.70  | 1.25  | 4.84  | 2.26  | 1.24  | 0.46  | 0.01  | 1.45  | 0.63  |
| K <sub>2</sub> O               | 6.68   | 0.42   | 0.32  | 0.12  | 0.44  | 1.77  | 0.30  | 2.73  | 0.61  | 0.21  | 0.16  | 0.11  | 0.21  | 0.09  |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.02   | 1.06   | 1.03  | 1.15  | 1.60  | 0.92  | 2.55  | 0.61  | 0.36  | 2.28  | 2.35  | 0.98  | 1.39  | 0.15  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.15   | 1.89   | 0.28  | 0.21  | 2.19  | 0.21  | 0.29  | 0.32  | 0.12  | 0.31  | 0.31  | 0.33  | 0.26  | 0.06  |
| MnO                            | 0.01   | 0.24   | 0.07  | 0.18  | 0.30  | 0.15  | 0.22  | 0.09  | 0.04  | 0.20  | 0.23  | 0.25  | 0.20  | 0.19  |
| G.V.                           | 0.57   | 1.11   | 0.25  | 1.39  | 0.35  | 1.36  | 0.26  | 1.29  | 0.23  | 0.61  | 0.53  | 0.27  | 0.73  | 1.40  |
| SUM                            | 100.94 | 100.25 | 99.43 | 99.28 | 99.73 | 99.43 | 98.80 | 99.77 | 99.01 | 99.99 | 99.17 | 98.88 | 99.88 | 99.89 |
| H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>  | 0.12   | 0.54   | 0.26  | 0.23  | 0.23  | 0.40  | 0.13  | 0.27  | 0.13  | 0.24  | 0.65  | 0.23  | 0.32  | 0.41  |
| V                              | 23     | 75     | 51    | 69    | 56    | Sp    | 420   | Sp    | 24    | 410   | 270   | 130   | 65    | 8     |
| Cr                             | Sp     | 150    | 125   | 370   | 230   | 380   | 250   | 235   | 48    | 120   | 230   | 380   | 425   | 600   |
| Ni                             | 20     | 51     | 74    | 130   | 80    | 230   | 140   | 135   | 81    | 100   | 120   | 110   | 125   | 130   |
| Cu                             | 16     | 10     | 79    | Sp    | Sp    | 100   | 100   | 425   | 31    | 100   | 70    | 34    | 50    | 220   |
| Zn                             | 135    | 71     | 29    | 78    | 130   | 47    | 110   | 31    | Sp    | 130   | 55    | 72    | 93    | 240   |
| Ga                             | 19     | 16     | 15    | 15    | 14    | 17    | 21    | 15    | 8     | 20    | 17    | 19    | 17    | 15    |
| Pb                             | 19     | 11     | 7     | 17    | 20    | 19    | 12    | 27    | 7     | 18    | 8     | 10    | 18    | 55    |
| Rb                             | 650    | 36     | 41    | 24    | 29    | 56    | 21    | 68    | 45    | 22    | 22    | 26    | 24    | 20    |
| Si                             | 37     | 650    | 580   | 150   | 1710  | 2210  | 190   | 1710  | 145   | 220   | 220   | 360   | 340   | Sp    |
| Y                              | 74     | 22     | 38    | 22    | 25    | 27    | 20    | 34    | 40    | 22    | 22    | 18    | 22    | 13    |
| Zr                             | 175    | 355    | 365   | 38    | 460   | 490   | 47    | 500   | 315   | 55    | 62    | 59    | 76    | Sp    |



Profil B

Profil C

| Nr                             | 26    | 27     | 28    | 29     | 30    | 31    | 32    | 33    | 1     |       |       |       | 2  | 3  | 4  |
|--------------------------------|-------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----|----|----|
| Typ                            | A2    | A2     | A2    | A2     | A2    | A2    | A2    | A2    | A2    |       |       |       | A2 | A2 | GG |
| SiO <sub>2</sub>               | 45.97 | 46.02  | 43.00 | 46.63  | 50.25 | 45.93 | 47.34 | 45.66 | 46.72 | 48.84 | 89.00 | 57.45 |    |    |    |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 13.82 | 13.56  | 15.09 | 13.93  | 15.10 | 14.90 | 14.51 | 15.97 | 14.68 | 14.18 | 0.04  | 10.55 |    |    |    |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 11.87 | 15.27  | 14.02 | 13.12  | 11.88 | 13.16 | 10.98 | 14.43 | 12.30 | 12.23 | 7.10  | 8.41  |    |    |    |
| MgO                            | 10.71 | 8.95   | 7.42  | 5.74   | 6.53  | 5.50  | 10.68 | 5.40  | 8.58  | 8.22  | 0.83  | 2.34  |    |    |    |
| CaO                            | 13.52 | 12.16  | 16.77 | 15.59  | 10.58 | 14.33 | 12.78 | 12.70 | 13.14 | 14.13 | 0.14  | 1.84  |    |    |    |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.79  | 1.43   | 0.77  | 1.00   | 1.27  | 0.90  | 0.53  | 0.46  | 0.85  | 0.24  | 0.26  | Sp    |    |    |    |
| K <sub>2</sub> O               | 0.16  | 0.37   | 0.32  | 0.33   | 0.22  | 0.32  | 0.13  | 0.28  | 0.48  | 0.23  | 1.02  | Sp    |    |    |    |
| TiO <sub>2</sub>               | 1.19  | 1.67   | 1.92  | 2.25   | 1.64  | 2.56  | 0.88  | 3.68  | 1.38  | 0.95  | 0.05  | 0.41  |    |    |    |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.26  | 0.31   | 0.17  | 0.32   | 0.23  | 0.64  | 0.21  | 0.58  | 0.19  | 0.19  | 0.34  | 0.18  |    |    |    |
| MnO                            | 0.17  | 0.19   | 0.20  | 0.22   | 0.16  | 0.22  | 0.21  | 0.21  | 0.20  | 0.20  | 0.50  | 17.70 |    |    |    |
| G.V.                           | 0.95  | 0.78   | 0.24  | 0.94   | 1.72  | 0.40  | 0.82  | 0.33  | 0.65  | 0.43  | 0.16  | 0.38  |    |    |    |
| SUM                            | 99.49 | 100.72 | 99.92 | 100.07 | 99.58 | 98.86 | 99.07 | 99.70 | 99.17 | 99.84 | 99.44 | 99.26 |    |    |    |
| H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>  | 0.25  | 0.27   | 0.17  | 0.51   | 0.32  | 0.22  | 0.37  | 0.28  | 0.30  | 0.17  | 0.11  | 0.26  |    |    |    |
| V                              | 18    | 185    | 200   | 280    | 205   | 260   | 120   | 380   | 190   | 120   | 150   | 100   |    |    |    |
| Cr                             | 490   | 290    | 140   | 200    | 220   | 160   | 120   | 170   | 280   | 250   | 80    | 480   |    |    |    |
| Ni                             | 180   | 105    | 74    | 76     | 105   | 77    | 130   | 40    | 100   | 110   | 39    | 47    |    |    |    |
| Cu                             | 102   | 70     | 13    | 20     | 35    | 48    | 11    | 74    | 41    | 70    | 36    | 35    |    |    |    |
| Zn                             | 75    | 93     | 55    | 105    | 88    | 73    | 38    | 51    | 43    | 43    | 60    | 29    |    |    |    |
| Ga                             | 14    | 18     | 17    | 18     | 23    | 18    | 17    | 18    | 16    | 14    | 8     | 9     |    |    |    |
| Pb                             | 13    | 21     | 9     | 11     | 14    | 8     | 10    | 7     | 10    | 7     | 75    | 7     |    |    |    |
| Rb                             | 21    | 22     | 26    | 23     | 25    | 26    | 25    | 22    | 26    | 22    | 28    | 17    |    |    |    |
| Sr                             | 130   | 125    | 280   | 315    | 170   | 320   | 160   | 230   | 180   | 120   | Sp    | Sp    |    |    |    |
| Y                              | 21    | 21     | 19    | 19     | 21    | 29    | 22    | 22    | 23    | 19    | 26    | 15    |    |    |    |
| Zr                             | 42    | 38     | 47    | 68     | 52    | 100   | 46    | 130   | 47    | 36    | 100   | Sp    |    |    |    |



Profil C

| Nr                             | 5      | 6      | 7      | 8     | 9     | 10    | 11    | 12     | 13    | 14     | 15    | 16    | 17     | 18    |
|--------------------------------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|
| Typ                            | AP     | AP     | HG     | A2    | A2    | AP    | A2    | Mw     | A2    | Mw     | MP    | A2    | MP     | MP    |
| SiO <sub>2</sub>               | 40.10  | 40.63  | 52.32  | 48.79 | 45.05 | 48.22 | 47.84 | 46.44  | 47.52 | 75.40  | 49.33 | 45.49 | 47.62  | 47.75 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 9.08   | 6.90   | 11.17  | 13.37 | 11.37 | 8.47  | 14.09 | 19.30  | 13.41 | 12.78  | 7.21  | 12.85 | 5.78   | 5.79  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 9.26   | 9.64   | 7.91   | 16.04 | 14.29 | 11.77 | 13.33 | 15.64  | 15.70 | 2.18   | 14.76 | 16.47 | 19.74  | 17.26 |
| MgO                            | 6.70   | 7.58   | 5.48   | 6.67  | 9.58  | 5.85  | 9.65  | 5.51   | 8.95  | 0.33   | 18.21 | 7.29  | 18.52  | 17.20 |
| CaO                            | 25.95  | 26.96  | 18.67  | 10.75 | 16.13 | 20.62 | 11.30 | 0.55   | 10.71 | 1.15   | 4.28  | 11.12 | 3.45   | 6.94  |
| Na <sub>2</sub> O              | 3.00   | 2.95   | 0.70   | 0.31  | 0.17  | 0.92  | 0.43  | 2.02   | 0.27  | 2.59   | 1.38  | 0.59  | 1.17   | 0.69  |
| K <sub>2</sub> O               | 0.23   | 0.36   | 0.68   | 0.23  | 0.16  | 0.31  | 0.13  | 5.08   | 0.18  | 4.80   | Sp    | 0.48  | 0.09   | 0.10  |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.78   | 0.45   | 0.62   | 1.45  | 1.23  | 0.35  | 1.30  | 1.23   | 2.21  | 0.27   | 0.61  | 2.47  | 1.04   | 1.25  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 4.05   | 5.27   | 2.56   | 0.23  | 0.20  | 2.10  | 0.21  | 0.08   | 0.29  | 0.03   | 0.16  | 0.27  | 0.17   | 0.22  |
| MnO                            | 0.18   | 0.27   | 0.24   | 0.24  | 0.25  | 0.41  | 0.29  | 0.13   | 0.25  | 0.05   | 0.33  | 0.42  | 0.12   | 0.14  |
| G.V.                           | 0.75   | 0.69   | 0.25   | 0.78  | 0.42  | 0.33  | 0.32  | 4.88   | 0.12  | 0.58   | 2.79  | 1.79  | 2.92   | 1.65  |
| SUM                            | 100.03 | 101.20 | 100.50 | 98.86 | 98.85 | 99.35 | 98.89 | 100.86 | 99.61 | 100.16 | 99.66 | 99.24 | 100.62 | 98.99 |
| H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>  | 0.13   | 0.27   | 0.09   | 0.20  | 0.09  | 0.10  | 0.10  | 1.29   | 0.08  | 0.13   | 0.34  | 0.34  | 0.29   | 0.08  |
| V                              | 43     | 60     | 210    | 300   | 180   | Sp    | Sp    | 220    | 270   | 60     | 120   | 320   | 190    | 190   |
| Cr                             | 180    | 88     | 210    | 100   | 175   | 140   | 460   | 360    | 350   | Sp     | 2160  | 280   | 760    | 690   |
| Ni                             | 48     | 25     | 45     | 70    | 62    | 58    | 76    | 84     | 100   | 2      | 810   | 66    | 610    | 650   |
| Cu                             | 4      | 4      | 19     | 28    | 15    | 16    | 45    | 17     | 25    | 11     | 32    | 41    | 37     | 89    |
| Zn                             | 28     | 72     | 18     | 85    | 79    | 155   | 74    | 25     | 67    | Sp     | 100   | 78    | 110    | 87    |
| Ga                             | 9      | 7      | 20     | 14    | 14    | 13    | 16    | 24     | 17    | 14     | 15    | 15    | 13     | 14    |
| Pb                             | 16     | 29     | 15     | 27    | 16    | 29    | 8     | 11     | 8     | 14     | 11    | 7     | 9      | 6     |
| Rb                             | 25     | 24     | 38     | 21    | 21    | 24    | 22    | 110    | 20    | 120    | 29    | 20    | 25     | 20    |
| Str                            | 862    | 636    | 2690   | 33    | 120   | 1400  | 45    | Sp     | Sp    | 190    | Sp    | 110   | Sp     | Sp    |
| Y                              | 24     | 25     | 30     | 21    | 21    | 22    | 21    | 27     | 22    | 48     | 45    | 23    | 20     | 17    |
| Zr                             | 171    | 130    | 590    | Sp    | 44    | 260   | 24    | 80     | 14    | 250    | 35    | 12    | 10     | 15    |



profil C

| Nr                             | 19    | 20     | 21     | 22    | 23    | 24     | 25    | 26    | 27     | 28     | 29    | 30     | 31    | 32    |
|--------------------------------|-------|--------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|--------|-------|--------|-------|-------|
| Type                           | MP    | BG     | GG     | A2    | A2    | HG     | A2    | A2    | MP     | AP     | AP    | A2     | A2    | A2    |
| SiO <sub>2</sub>               | 45.55 | 74.58  | 52.79  | 46.83 | 49.85 | 55.81  | 46.51 | 48.17 | 45.08  | 46.80  | 45.77 | 46.95  | 45.44 | 47.12 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 5.80  | 13.37  | 19.80  | 13.65 | 13.60 | 10.84  | 14.15 | 16.22 | 12.92  | 7.08   | 5.93  | 14.42  | 14.57 | 14.89 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 19.50 | 2.63   | 14.19  | 13.81 | 12.42 | 6.78   | 11.65 | 6.06  | 7.56   | 7.18   | 6.25  | 13.26  | 14.47 | 10.04 |
| MgO                            | 17.77 | 0.44   | 5.68   | 9.64  | 6.64  | 11.16  | 6.74  | 11.18 | 16.08  | 13.19  | 15.22 | 7.99   | 7.95  | 11.29 |
| CaO                            | 5.57  | 1.34   | 0.56   | 12.04 | 13.35 | 13.53  | 15.06 | 14.04 | 16.37  | 24.42  | 25.26 | 13.35  | 11.55 | 14.25 |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.94  | 2.15   | 1.23   | 0.47  | 0.02  | 0.18   | 0.43  | 1.29  | 0.31   | Sp     | 0.03  | 1.37   | 0.82  | 0.15  |
| K <sub>2</sub> O               | 0.10  | 5.03   | 3.97   | 0.24  | 0.25  | Sp     | 0.27  | Sp    | 0.34   | 0.33   | 0.23  | 0.32   | 0.33  | 0.21  |
| TiO <sub>2</sub>               | 1.31  | 0.31   | 1.76   | 1.51  | 1.87  | 0.28   | 2.30  | 0.29  | 0.40   | 0.42   | 0.34  | 1.29   | 2.67  | 0.85  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.27  | 0.12   | 0.08   | 0.24  | 0.42  | 0.34   | 0.61  | 0.31  | 0.24   | 0.88   | 0.21  | 0.18   | 0.30  | 0.24  |
| MnO                            | 0.14  | 0.05   | 0.34   | 0.21  | 0.22  | 0.18   | 0.32  | 0.11  | 0.13   | 0.15   | 0.20  | 0.17   | 0.26  | 0.15  |
| G.V.                           | 2.11  | 0.14   | 0.55   | 0.47  | 0.42  | 0.90   | 0.59  | 1.05  | 0.78   | 0.28   | 0.55  | 0.79   | 0.88  | 0.52  |
| SUM                            | 99.46 | 100.45 | 100.95 | 99.11 | 99.06 | 100.00 | 98.93 | 98.72 | 100.21 | 100.73 | 99.99 | 100.09 | 99.24 | 99.71 |
| H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>  | 0.07  | 0.14   | 0.17   | 0.15  | 0.16  | 0.32   | 0.21  | 0.29  | 0.21   | 0.15   | 0.24  | 0.14   | 0.24  | 0.05  |
| V                              | 210   | 78     | 240    | 180   | 180   | 50     | 250   | 59    | 55     | 45     | 45    | 160    | 290   | 120   |
| Cr                             | 800   | 8      | 280    | 300   | 150   | 41     | 190   | 990   | 940    | Sp     | Sp    | 280    | 350   | 200   |
| Ni                             | 540   | 16     | 90     | 110   | 85    | 60     | 80    | 290   | 280    | 35     | 22    | 85     | 65    | 150   |
| Cu                             | 80    | 24     | 9      | 65    | 18    | 11     | 7     | 15    | 11     | Sp     | Sp    | 43     | 16    | 18    |
| Zn                             | 90    | Sp     | 130    | 55    | 85    | 130    | 85    | 6     | 12     | 65     | 65    | 42     | 65    | 38    |
| Ga                             | 16    | 16     | 20     | 18    | 20    | 18     | 19    | 16    | 14     | 12     | 12    | 15     | 17    | 15    |
| Pb                             | 7     | 20     | 12     | 9     | 9     | 13     | 10    | 13    | 12     | 13     | 14    | 10     | 9     | 12    |
| Rb                             | 22    | 125    | 83     | 22    | 25    | 30     | 24    | 27    | 27     | 26     | 26    | 21     | 23    | 25    |
| Sr                             | Sp    | 205    | 63     | 97    | 330   | 200    | 260   | 240   | 150    | 850    | 310   | 110    | 190   | 310   |
| Y                              | 15    | 46     | 38     | 22    | 26    | 34     | 26    | 20    | 21     | 25     | 21    | 29     | 22    | 21    |
| Zr                             | 6     | 230    | 130    | 30    | 150   | 130    | 230   | 71    | 52     | 181    | 110   | 17     | 55    | 85    |



Profil C

| Nr                             | 33    | 34    | 35    | 36    | 37    | 38    | 39    | 40    | 41    | 42     | 43     | 44    | 45     | 46    |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|--------|-------|
| Typ                            | MT    | Q     | Q     | A2    | Q     | HG    | A2    | A2    | MP    | A2     | Q      | A2    | MG     | A2    |
| SiO <sub>2</sub>               | 48.63 | 92.43 | 95.92 | 48.59 | 89.19 | 58.96 | 49.41 | 47.38 | 47.84 | 45.97  | 97.89  | 47.50 | 50.23  | 45.49 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 6.12  | 0.11  | Sp    | 14.91 | 0.57  | 16.45 | 16.16 | 16.77 | 11.42 | 14.96  | Sp     | 13.98 | 17.51  | 14.71 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 25.62 | 3.16  | 1.19  | 14.99 | 6.92  | 9.65  | 10.88 | 11.89 | 12.10 | 14.53  | 0.69   | 15.10 | 15.11  | 16.54 |
| MgO                            | 10.97 | 0.80  | 0.26  | 5.92  | 0.82  | 2.73  | 5.91  | 6.88  | 12.66 | 7.18   | 0.16   | 6.37  | 6.21   | 6.83  |
| CaO                            | 5.69  | 0.99  | 0.02  | 10.37 | 0.16  | 6.18  | 12.01 | 12.90 | 12.55 | 11.88  | Sp     | 10.41 | 2.63   | 9.83  |
| Na <sub>2</sub> O              | 1.31  | U.15  | 0.20  | 0.13  | Sp    | Sp    | 1.24  | U.62  | 0.58  | 0.50   | 0.23   | 1.15  | 2.35   | 0.46  |
| K <sub>2</sub> O               | 0.14  | 1.02  | 1.02  | 0.16  | 1.02  | Sp    | 0.86  | 0.28  | U.17  | 0.27   | 1.02   | 0.24  | 4.34   | 0.22  |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.01  | 0.14  | 0.20  | 3.12  | 0.07  | 1.43  | 1.60  | 1.40  | 1.06  | 3.58   | U.17   | 3.10  | 1.66   | 3.48  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.07  | 0.31  | 0.16  | 0.38  | 0.29  | 0.21  | 0.32  | 0.34  | 0.20  | 0.55   | 0.12   | 0.38  | 0.13   | 0.39  |
| MnO                            | Sp    | 0.11  | 0.03  | 0.26  | 0.44  | 0.12  | 0.17  | U.38  | 0.23  | 0.23   | 0.01   | 0.20  | 0.21   | 0.22  |
| G.V.                           | 0.82  | U.34  | 0.23  | U.59  | 0.41  | 3.92  | 0.95  | 1.12  | 0.79  | 0.40   | 0.21   | 0.85  | 0.56   | 1.69  |
| SUM                            | 99.38 | 99.56 | 99.23 | 99.42 | 99.89 | 99.65 | 99.51 | 98.96 | 99.60 | 100.05 | 100.50 | 99.28 | 100.94 | 99.86 |
| H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>  | 0.25  | 0.13  | 0.15  | 0.05  | 0.25  | 0.65  | 0.37  | 0.26  | 0.09  | 0.12   | 0.11   | 0.14  | 0.14   | 0.78  |
| V                              | 160   | 105   | 110   | 350   | 155   | 150   | 180   | 150   | 140   | 370    | 94     | 330   | 240    | 400   |
| Cr                             | 470   | 39    | 12    | 250   | 60    | 140   | 130   | 360   | 750   | 200    | 14     | 210   | 280    | 270   |
| Ni                             | 60    | 42    | 28    | 41    | 41    | 90    | 75    | 100   | 160   | 65     | 31     | 60    | 60     | 60    |
| Cu                             | 30    | 32    | 45    | 150   | 24    | 160   | 7     | 23    | 13    | 190    | 26     | 15    | 19     | 60    |
| Zn                             | 95    | 115   | 145   | 80    | 69    | 55    | 65    | 95    | 55    | 70     | 93     | 65    | 90     | 80    |
| Ga                             | 13    | 12    | 14    | 20    | 11    | 21    | 19    | 18    | 16    | 16     | 12     | 17    | 15     | 17    |
| Pb                             | 8     | 63    | 85    | 9     | 92    | 13    | 12    | 9     | 8     | 10     | 62     | 9     | 16     | 7     |
| Rb                             | 19    | 28    | 32    | 21    | 27    | 25    | 36    | 26    | 24    | 21     | 30     | 23    | 75     | 20    |
| Sr                             | Sp    | Sp    | Sp    | 470   | Sp    | 390   | 790   | 360   | 120   | 320    | Sp     | 320   | 250    | 300   |
| Y                              | 12    | 28    | 31    | 24    | 26    | 25    | 23    | 20    | 21    | 21     | 31     | 22    | 39     | 20    |
| Zr                             | Sp    | 95    | 180   | 140   | 76    | 240   | 180   | 65    | 48    | 100    | 140    | 110   | 190    | 85    |



| Nr                             | 47    | 48     | 49    | 50    | 51    | 52    | 53    | 54    | 55    | 56    | 57    | 58     | 59     | 60    |
|--------------------------------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|
| Typ                            | Q     | Q      | BG    | Q     | MP    | Q     | Q     | A2    | Q     | MP    | Q     | CG     | MG     | HE    |
| SiO <sub>2</sub>               | 94.47 | 98.03  | 71.69 | 95.08 | 43.94 | 92.21 | 83.55 | 45.76 | 94.20 | 45.30 | 91.66 | 64.56  | 56.86  | 47.73 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.17  | Sp     | 15.98 | 0.09  | 8.98  | 0.69  | 6.35  | 16.92 | 0.93  | 8.28  | 0.43  | 14.72  | 13.62  | 10.28 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 2.46  | 0.13   | 1.31  | 1.76  | 28.78 | 2.72  | 4.57  | 15.11 | 1.58  | 25.28 | 2.98  | 12.15  | 8.85   | 9.86  |
| MgO                            | 0.56  | 0.35   | 0.40  | 0.47  | 10.89 | 0.59  | 0.75  | 4.93  | 0.56  | 16.51 | 0.50  | 2.00   | 1.39   | 10.78 |
| CaO                            | 0.03  | Sp     | 1.88  | Sp    | 0.29  | Sp    | Sp    | 9.49  | Sp    | 0.25  | 0.03  | Sp     | 7.67   | 16.85 |
| Na <sub>2</sub> O              | Sp    | 0.15   | 4.21  | 0.43  | 0.53  | 0.38  | 0.25  | 1.07  | 0.28  | 0.13  | 0.53  | Sp     | 4.64   | 0.01  |
| K <sub>2</sub> O               | 1.07  | 1.82   | 3.51  | 1.06  | 0.69  | 1.05  | 0.63  | 0.24  | 1.05  | 0.34  | 1.09  | 2.88   | 3.56   | 0.12  |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.57  | 0.34   | 0.26  | 0.53  | 0.16  | 0.53  | 0.89  | 3.71  | 0.55  | 0.12  | 0.40  | 2.01   | 1.34   | 1.10  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.13  | 0.09   | 0.01  | 0.12  | 0.05  | 0.10  | 0.13  | 0.36  | 0.09  | 0.04  | 0.10  | 0.03   | 1.40   | 0.48  |
| MnO                            | 0.01  | 0.01   | 0.01  | 0.01  | 0.03  | 0.02  | 0.07  | 0.22  | 0.01  | 0.05  | 0.02  | 0.17   | 0.41   | 0.22  |
| G.V.                           | 0.33  | 0.25   | 0.37  | 0.28  | 4.79  | 0.39  | 2.00  | 1.37  | 0.41  | 3.10  | 0.46  | 2.95   | 0.55   | 1.18  |
| SUM                            | 99.80 | 100.37 | 99.63 | 99.83 | 99.13 | 98.68 | 99.19 | 99.18 | 99.66 | 99.40 | 98.20 | 101.47 | 100.29 | 99.61 |
| H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>  | 0.16  | 0.10   | 0.11  | 0.16  | 1.62  | 0.10  | 0.39  | 0.79  | 0.21  | 0.98  | 0.22  | 0.45   | 0.75   | 0.80  |
| V                              | 110   | 98     | Sp    | 115   | 290   | 100   | 90    | 410   | 95    | Sp    | 82    | 275    | Sp     | 196   |
| Cr                             | 420   | 22     | 110   | 36    | 1520  | 73    | 80    | 230   | 41    | 2500  | 56    | 235    | 500    | 69    |
| Ni                             | 44    | 39     | 33    | 36    | 160   | 52    | 90    | 43    | 44    | 86    | 31    | 110    | 81     | 38    |
| Cu                             | 48    | 39     | 14    | 37    | 120   | 30    | 80    | 85    | 49    | 28    | 11    | 36     | 7      | 16    |
| Zn                             | 74    | 105    | Sp    | 91    | 330   | 77    | 55    | 55    | 68    | 420   | 58    | 71     | 215    | 120   |
| Ga                             | 14    | 14     | 18    | 13    | 20    | 9     | 18    | 18    | 12    | 26    | 8     | 20     | 18     | 18    |
| Pb                             | 36    | 45     | 55    | 37    | 12    | 37    | 27    | 8     | 38    | Sp    | 34    | 2      | 23     | 24    |
| Rb                             | 33    | 32     | 76    | 32    | 50    | 32    | 47    | 22    | 31    | 46    | 34    | 70     | 66     | 16    |
| Sr                             | 20    | Sp     | 1820  | Sp    | Sp    | Sp    | 7     | 230   | Sp    | Sp    | Sp    | 47     | 2260   | 550   |
| Y                              | 29    | 31     | 37    | 32    | 12    | 33    | 39    | 22    | 33    | 15    | 30    | 50     | 82     | 36    |
| Zr                             | 245   | 275    | 540   | 260   | Sp    | 255   | 270   | 95    | 300   | Sp    | 230   | 550    | 295    | 170   |



| №                              | 61    | 62     | 63     | 64    | 65     | 66     | 67    | 68    | 69     | 70    | 71    | 72    | 73     | 74     |
|--------------------------------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|
| Typ                            | MG    | Mw     | A1     | A1    | Mw     | Mw     | A1    | Q     | MP     | A1    | A2    | Q     | MP     | Mw     |
| SiO <sub>2</sub>               | 41.19 | 54.41  | 45.57  | 43.73 | 61.45  | 56.01  | 49.09 | 95.37 | 45.01  | 43.48 | 47.45 | 95.10 | 41.68  | 54.04  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 8.48  | 18.86  | 13.74  | 16.25 | 16.93  | 17.60  | 15.64 | 1.05  | 7.13   | 20.65 | 20.02 | 1.06  | 12.53  | 19.31  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 20.93 | 12.32  | 17.57  | 16.03 | 11.39  | 13.39  | 12.27 | 0.47  | 19.48  | 16.19 | 14.80 | 0.38  | 26.84  | 13.26  |
| MgO                            | 6.82  | 3.95   | 7.14   | 6.92  | 1.24   | 4.33   | 4.20  | 0.39  | 12.74  | 7.53  | 5.01  | 0.52  | 11.01  | 2.92   |
| CaO                            | 14.37 | 0.15   | 10.63  | 10.27 | 0.09   | 0.05   | 14.66 | 0.01  | 0.31   | 2.45  | 2.77  | Sp    | 0.25   | 0.05   |
| Na <sub>2</sub> O              | 1.53  | 0.40   | 0.11   | 1.21  | Sp     | 0.21   | 0.31  | 0.46  | 1.10   | 1.00  | 0.67  | 0.42  | 0.36   | 0.14   |
| K <sub>2</sub> O               | 0.27  | 4.47   | 0.28   | 0.35  | 3.82   | 3.38   | 0.24  | 1.02  | 0.41   | 0.14  | 0.13  | 1.01  | 0.10   | 3.03   |
| TiO <sub>2</sub>               | 1.98  | 1.94   | 3.92   | 2.86  | 1.54   | 2.04   | 1.40  | 0.52  | 0.46   | 2.83  | 3.73  | 0.36  | 1.01   | 1.82   |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 2.49  | 0.12   | 0.50   | 0.32  | 0.04   | 0.07   | 0.21  | 0.08  | 0.08   | 0.17  | 0.16  | 0.08  | 0.06   | 0.06   |
| MnO                            | 0.22  | 0.14   | 0.35   | 0.25  | 0.11   | 0.21   | 0.23  | 0.02  | Sp     | 1.15  | 0.83  | 0.02  | 0.06   | 0.18   |
| G.V.                           | 0.82  | 3.73   | 0.20   | 0.60  | 4.07   | 3.73   | 1.12  | 0.35  | 3.68   | 4.26  | 3.62  | 0.39  | 6.35   | 5.62   |
| SUM                            | 99.10 | 100.49 | 100.01 | 98.79 | 100.68 | 101.02 | 99.33 | 99.74 | 100.40 | 99.85 | 99.19 | 99.34 | 100.34 | 100.46 |
| H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>  | 0.62  | 0.32   | 0.22   | 0.19  | 0.56   | 0.32   | 0.22  | 0.12  | 0.82   | 1.07  | 0.84  | 0.16  | 1.18   | 0.90   |
| V                              | 470   | 230    | 440    | 420   | 220    | 300    | 150   | 95    | Sp     | 290   | 355   | 110   | Sp     | 370    |
| Cr                             | 195   | 210    | 325    | 280   | 170    | 140    | 310   | 21    | 500    | 740   | 1190  | 15    | 2540   | 115    |
| Ni                             | 74    | 77     | 73     | 71    | 52     | 84     | 71    | 37    | 12     | 130   | 230   | 34    | 72     | 78     |
| Cu                             | 23    | 61     | 73     | 25    | 32     | 27     | 13    | 45    | Sp     | 34    | 75    | 38    | 33     | 15     |
| Zn                             | 275   | 140    | 240    | 165   | 44     | 195    | 77    | 91    | 1140   | 1010  | 560   | 74    | 460    | 170    |
| Ga                             | 16    | 25     | 20     | 19    | 20     | 26     | 21    | 12    | 21     | 22    | 21    | 14    | 30     | 24     |
| Pb                             | 11    | 11     | Sp     | 5     | 12     | 15     | 10    | 35    | 790    | 9     | Sp    | 61    | Sp     | 23     |
| Rb                             | 19    | 78     | 11     | 14    | 77     | 73     | 15    | 30    | 29     | 26    | 16    | 32    | 22     | 81     |
| Sr                             | 150   | 76     | 270    | 300   | 61     | 18     | 460   | Sp    | Sp     | 770   | 900   | Sp    | Sp     | 46     |
| Y                              | 28    | 46     | 52     | 29    | 41     | 35     | 37    | 31    | 13     | 155   | 105   | 32    | 24     | 24     |
| Zr                             | 19    | 185    | 240    | 175   | 275    | 183    | 120   | 205   | Sp     | 410   | 420   | 250   | Sp     | 330    |



| Nr                             | 75    | 76     | 77     | 78    | 79     | 80    | 81     | 82    | 83    | 84    | 85     | 86    |
|--------------------------------|-------|--------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|
| Typ                            | CG    | CG     | Gm     | A1    | CG     | HQ    | A1     | MP    | CG    | CG    | Q      | CG    |
| SiO <sub>2</sub>               | 76.63 | 64.16  | 57.20  | 42.02 | 59.01  | 80.45 | 44.61  | 47.04 | 74.33 | 69.57 | 91.42  | 77.92 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 9.51  | 15.53  | 17.82  | 15.46 | 16.60  | 7.27  | 15.44  | 5.96  | 10.21 | 11.91 | 3.23   | 8.65  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 5.87  | 10.27  | 13.47  | 17.94 | 13.16  | 5.27  | 17.67  | 18.46 | 7.03  | 8.20  | 2.45   | 6.44  |
| MgO                            | 1.48  | 2.97   | 4.43   | 6.93  | 4.26   | 11.5  | 7.39   | 21.03 | 1.64  | 2.29  | 0.59   | 1.67  |
| CaO                            | Sp    | 0.61   | 0.28   | 9.64  | 0.25   | 1.07  | 9.56   | 1.86  | 0.47  | Sp    | 0.04   | Sp    |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.47  | Sp     | Sp     | 1.38  | Sp     | 1.38  | 0.20   | 0.56  | 1.03  | 0.59  | 0.68   | Sp    |
| K <sub>2</sub> O               | 1.97  | 3.16   | 3.77   | 0.40  | 3.32   | 0.64  | 0.33   | 0.17  | 1.40  | 2.56  | 1.09   | 1.56  |
| TiO <sub>2</sub>               | 1.36  | 1.16   | 1.30   | 4.03  | 1.22   | 0.93  | 3.43   | 0.65  | 1.15  | 1.31  | 0.66   | 0.92  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.13  | 0.10   | 0.06   | 0.44  | 0.04   | 0.09  | 0.52   | 0.07  | 0.13  | 0.13  | 0.07   | 0.10  |
| MnO                            | 0.06  | 0.23   | 0.19   | 0.30  | 0.22   | 0.15  | 0.17   | 0.10  | 0.14  | 0.13  | 0.05   | 0.13  |
| G.V.                           | 1.57  | 1.83   | 2.73   | 0.83  | 2.89   | 0.50  | 0.96   | 3.74  | 1.70  | 2.18  | 0.52   | 1.86  |
| SUM                            | 99.05 | 100.02 | 101.25 | 99.37 | 100.97 | 98.90 | 100.28 | 99.64 | 99.23 | 98.87 | 100.80 | 99.25 |
| H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>  | 0.20  | 0.21   | 0.29   | 0.48  | 0.37   | 0.15  | 0.31   | 0.54  | 0.26  | 0.15  | 0.28   | 0.22  |
| V                              | 130   | 270    | 280    | 700   | 220    | 120   | 550    | Sp    | 150   | 220   | 120    | 140   |
| Cr                             | 110   | 72     | 130    | 330   | 170    | 115   | 220    | 1520  | 105   | 120   | 31     | 69    |
| Ni                             | 43    | 61     | 77     | 190   | 72     | 53    | 100    | 530   | 57    | 82    | 29     | 70    |
| Cu                             | 27    | 14     | 12     | 400   | 23     | 39    | 36     | 99    | 15    | 33    | 20     | 48    |
| Zn                             | 40    | 140    | 165    | 220   | 165    | 38    | 120    | 260   | 79    | 95    | 55     | 93    |
| Ga                             | 20    | 19     | 21     | 20    | 21     | 14    | 21     | 18    | 17    | 17    | 11     | 21    |
| Pb                             | 5     | 29     | 24     | Sp    | 18     | 9     | Sp     | Sp    | 14    | 10    | 38     | 21    |
| Rb                             | 74    | 74     | 75     | 14    | 77     | 39    | 13     | 23    | 59    | 105   | 34     | 75    |
| Sr                             | 28    | 120    | 14     | 265   | 62     | 190   | 92     | Sp    | 210   | 24    | Sp     | 17    |
| Y                              | 32    | 47     | 36     | 46    | 53     | 42    | 55     | 18    | 40    | 38    | 36     | 38    |
| Zr                             | 375   | 190    | 145    | 305   | 230    | 560   | 210    | Sp    | 335   | 235   | 325    | 165   |



| Nr                             | 1      | 2     | 3     | 4      | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11     | 12    | 13    | 14    |
|--------------------------------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|
| Typ                            | Q      | A2    | Q     | A1     | Q     | Q     | A1    | A1    | MG    | A1    | A1     | A1    | TA    | TA    |
| SiO <sub>2</sub>               | 96.24  | 44.38 | 96.20 | 43.94  | 96.25 | 91.40 | 44.23 | 46.52 | 51.01 | 41.47 | 43.49  | 44.92 | 44.76 | 49.12 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1.20   | 14.98 | 0.47  | 12.08  | 0.83  | 3.73  | 13.86 | 15.81 | 14.87 | 17.50 | 13.99  | 16.03 | 8.48  | 6.12  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Sp     | 16.26 | 0.40  | 19.53  | 0.04  | Sp    | 17.91 | 12.50 | 10.75 | 16.15 | 18.33  | 17.81 | 25.14 | 13.72 |
| MgO                            | 0.53   | 7.52  | 1.08  | 6.26   | 0.29  | 0.36  | 7.00  | 5.56  | 3.00  | 6.36  | 7.48   | 5.53  | 15.93 | 25.26 |
| CaO                            | Sp     | 11.43 | Sp    | 10.73  | Sp    | 0.02  | 11.12 | 14.81 | 11.95 | 10.91 | 10.79  | 9.03  | 0.33  | 1.65  |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.23   | 0.50  | Sp    | 1.17   | 0.59  | 0.78  | 0.75  | 1.32  | 2.78  | 0.91  | 0.32   | 0.75  | 0.52  | 0.09  |
| K <sub>2</sub> O               | 1.02   | 0.30  | 1.02  | 0.50   | 1.03  | 1.27  | 0.35  | 0.45  | 0.47  | 0.33  | 0.31   | 0.29  | 0.05  | 0.06  |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.62   | 3.08  | 0.49  | 5.48   | 0.42  | 0.44  | 3.35  | 2.05  | 1.10  | 3.48  | 4.45   | 3.90  | 0.24  | 0.28  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.17   | 0.45  | 0.09  | 0.72   | 0.06  | 0.18  | 0.39  | 0.28  | 2.38  | 0.34  | 0.57   | 0.33  | 0.17  | 0.05  |
| MnO                            | 0.01   | 0.30  | 0.02  | 0.31   | 0.02  | 0.02  | 0.28  | 0.18  | 0.36  | 0.28  | 0.29   | 0.26  | Sp    | 0.12  |
| G.V.                           | 0.20   | 0.08  | 0.19  | 0.11   | 0.16  | 0.13  | 0.27  | 0.36  | 0.55  | 1.20  | 0.50   | 0.50  | 4.14  | 3.36  |
| SUM                            | 100.22 | 99.28 | 99.96 | 100.83 | 99.69 | 98.33 | 99.52 | 99.84 | 99.26 | 98.93 | 100.52 | 99.35 | 99.75 | 99.83 |
| H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>  | 0.11   | 0.16  | 0.14  | 0.16   | 0.07  | 0.10  | 0.29  | 0.22  | 0.25  | 0.36  | 0.28   | 0.36  | 0.79  | 0.85  |
| V                              | 93     | 340   | 135   | 670    | 67    | 140   | 460   | 230   | Sp    | 580   | 420    | 610   | Sp    | Sp    |
| Cr                             | 92     | 355   | 14    | 970    | 31    | 53    | 290   | 270   | 430   | 180   | 800    | 190   | 1520  | 760   |
| Ni                             | 50     | 105   | 45    | 150    | 35    | 36    | 77    | 145   | 77    | 78    | 150    | 82    | 245   | 850   |
| Cu                             | 34     | 51    | 45    | 160    | 35    | 38    | 55    | 27    | Sp    | 33    | 145    | 35    | 33    | Sp    |
| Zn                             | 5      | 220   | 11    | 220    | 8     | 61    | 180   | 67    | 180   | 195   | 185    | 170   | 720   | 200   |
| Ga                             | 20     | 24    | 21    | 22     | 21    | 9     | 17    | 18    | 15    | 21    | 22     | 20    | 19    | 16    |
| Pb                             | 76     | 1     | 51    | Sp     | 36    | 72    | Sp    | 8     | 86    | 3     | Sp     | 3     | 59    | Sp    |
| Rb                             | 31     | 20    | 32    | 7      | 35    | 40    | 11    | 14    | 32    | 17    | 7      | 13    | 19    | 21    |
| Sr                             | Sp     | 46    | Sp    | 210    | Sp    | Sp    | 175   | 570   | 2950  | 200   | 210    | 230   | Sp    | Sp    |
| Y                              | 24     | 22    | 33    | 75     | 33    | 75    | 33    | 27    | 105   | 38    | 47     | 42    | 155   | 23    |
| Zr                             | 130    | 18    | 205   | 420    | 215   | 140   | 175   | 140   | 340   | 190   | 275    | 220   | Sp    | 43    |



| NR                             | 15    | 16     | 17    | 18     | 19     | 1     | 2     | 3     | 4      | 5     | 6     | 7     |
|--------------------------------|-------|--------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|
| Typ                            | A1    | Q      | MP    | A1     | MW     | A2    | A2    | HG    | BG     | HG    | A2    | HG    |
| SiO <sub>2</sub>               | 48.53 | 85.41  | 47.38 | 44.22  | 61.13  | 48.60 | 49.41 | 59.95 | 73.23  | 65.92 | 47.54 | 63.40 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 16.24 | 1.71   | 5.21  | 13.22  | 13.71  | 14.38 | 19.00 | 13.66 | 13.05  | 10.69 | 15.34 | 9.66  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 11.53 | 6.54   | 23.91 | 17.86  | 15.06  | 15.32 | 8.57  | 8.63  | 3.11   | 6.10  | 15.21 | 9.68  |
| MgO                            | 3.06  | 0.47   | 19.23 | 5.61   | 3.52   | 6.49  | 3.42  | 2.68  | 0.25   | 2.60  | 5.15  | 5.40  |
| CaO                            | 13.61 | 0.02   | 0.44  | 11.74  | Sp     | 9.85  | 14.63 | 8.68  | 1.76   | 10.38 | 10.28 | 7.37  |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.87  | 2.01   | 0.56  | 1.00   | Sp     | 0.72  | 0.87  | 0.46  | 3.11   | 0.52  | 1.25  | 0.43  |
| K <sub>2</sub> O               | 0.30  | 0.91   | 0.12  | 0.45   | 1.66   | 0.24  | 0.20  | 0.23  | 5.01   | 0.08  | 0.31  | 0.18  |
| TiO <sub>2</sub>               | 3.86  | 2.66   | 0.31  | 4.80   | 1.89   | 2.78  | 1.64  | 1.37  | 0.34   | 0.96  | 3.21  | 1.62  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.82  | 0.31   | 0.08  | 0.54   | 0.08   | 0.46  | 0.28  | 0.43  | 0.10   | 0.57  | 0.48  | 0.39  |
| MnO                            | 0.26  | 0.01   | 0.02  | 0.30   | 0.31   | 0.29  | 0.23  | 0.12  | 0.06   | 0.24  | 0.22  | 0.22  |
| G.V.                           | 0.51  | 0.19   | 2.37  | 0.35   | 3.34   | 0.15  | 0.96  | 3.21  | 0.26   | 0.86  | 0.14  | 0.71  |
| SUM                            | 99.59 | 100.24 | 99.62 | 100.08 | 100.70 | 99.28 | 99.21 | 99.42 | 100.28 | 98.92 | 99.13 | 99.06 |
| H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>  | 0.36  | 0.08   | 0.34  | 0.23   | 0.38   | 0.16  | 0.44  | 0.76  | 0.14   | 0.33  | 0.20  | 0.35  |
| V                              | 440   | 680    | 125   | 560    | 295    | 470   | 210   | 190   | 52     | 145   | 470   | Sp    |
| Cr                             | 295   | 220    | 610   | 530    | 335    | 170   | 120   | 130   | Sp     | 94    | 190   | 2950  |
| Ni                             | 71    | 77     | 150   | 140    | 120    | 75    | 62    | 45    | 2      | 63    | 50    | 325   |
| Cu                             | 31    | 100    | 25    | 190    | 21     | 63    | 13    | 5     | 13     | 16    | 53    | Sp    |
| Zn                             | 125   | 125    | 570   | 200    | 190    | 185   | 105   | 36    | 71     | 89    | 145   | 110   |
| Ga                             | 21    | 115    | 17    | 19     | 20     | 30    | 21    | 19    | 22     | 18    | 25    | 17    |
| Pb                             | Sp    | 4      | 105   | Sp     | 6      | 14    | 7     | 23    | 36     | 14    | 9     | Sp    |
| Rb                             | 8     | 32     | 26    | 8      | 48     | 22    | 26    | 29    | 215    | 28    | 23    | 24    |
| Sr                             | 580   | Sp     | Sp    | 290    | 60     | 115   | 165   | 320   | 210    | 285   | 240   | 38    |
| Y                              | 59    | 35     | 44    | 54     | 56     | 26    | 30    | 26    | 60     | 40    | 24    | 24    |
| Zr                             | 275   | 3850   | Sp    | 310    | 310    | 29    | 130   | 180   | 360    | -170  | 100   | 105   |



Profil E

| Nr                             | 8     | 9     | 10    | 11     | 12     | 13     | 14    | 15    | 16    | 17    | 18     | 19    | 20    | 21    |
|--------------------------------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|
| Typ                            | HG    | HG    | MP    | A2     | BG     | AP     | A2    | HQ    | A2    | A2    | A2     | MP    | A2    | A2    |
| SiO <sub>2</sub>               | 61.62 | 63.45 | 48.01 | 49.73  | 69.33  | 49.07  | 49.26 | 74.62 | 48.39 | 50.93 | 45.43  | 48.63 | 47.67 | 45.23 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 12.90 | 13.53 | 7.01  | 15.67  | 15.80  | 5.76   | 14.48 | 10.31 | 16.08 | 16.20 | 15.87  | 6.89  | 15.52 | 15.43 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 6.41  | 6.28  | 15.22 | 13.11  | 4.12   | 6.33   | 10.67 | 4.02  | 10.58 | 11.90 | 13.83  | 11.69 | 11.82 | 14.11 |
| MgO                            | 2.38  | 2.66  | 16.80 | 7.12   | 0.29   | 14.38  | 6.46  | 1.27  | 5.20  | 5.03  | 5.98   | 18.45 | 8.59  | 8.50  |
| CaO                            | 13.33 | 10.83 | 8.89  | 11.69  | 1.21   | 22.92  | 12.97 | 6.91  | 14.58 | 11.38 | 12.59  | 11.76 | 13.26 | 11.81 |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.64  | 0.49  | 1.03  | 0.27   | 3.78   | Sp     | 1.65  | 0.35  | 0.46  | 1.34  | 1.28   | 1.04  | 0.67  | 0.72  |
| K <sub>2</sub> O               | 0.05  | 0.17  | 0.15  | 0.21   | 5.30   | 0.29   | 0.37  | 0.04  | 0.22  | 0.22  | 0.28   | 0.20  | 0.18  | 0.21  |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.68  | 1.29  | 0.64  | 1.59   | 0.33   | 0.22   | 2.03  | 0.72  | 1.94  | 1.39  | 3.38   | 0.22  | 1.23  | 1.73  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.37  | 0.31  | 0.23  | 0.30   | 0.03   | 0.28   | 0.46  | 0.22  | 0.38  | 0.28  | 0.69   | 0.13  | 0.25  | 0.23  |
| MnO                            | 0.26  | 0.17  | 0.15  | 0.19   | 0.05   | 0.15   | 0.19  | 0.09  | 0.23  | 0.16  | 0.20   | 0.16  | 0.21  | 0.23  |
| G.V.                           | 0.73  | 0.35  | 0.82  | 0.31   | 0.34   | 0.66   | 0.55  | 0.49  | 0.66  | 0.24  | 0.66   | 0.77  | 0.44  | 0.41  |
| SUM                            | 99.37 | 99.53 | 98.95 | 100.19 | 100.58 | 100.06 | 99.09 | 99.04 | 98.99 | 99.07 | 100.20 | 99.93 | 99.84 | 98.61 |
| H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>  | 0.23  | 0.15  | 0.25  | 0.16   | 0.11   | 0.19   | 0.17  | 0.29  | 0.24  | 0.19  | 0.18   | 0.37  | 0.21  | 0.17  |
| V                              | 135   | 120   | 140   | 235    | 53     | 24     | 265   | 265   | 185   | 190   | 275    | Sp    | 61    | 295   |
| Cr                             | 67    | 105   | 355   | 140    | Sp     | 84     | 180   | Sp    | 275   | 170   | 470    | 1780  | 255   | 170   |
| Ni                             | 77    | 59    | 270   | 110    | 4      | 27     | 79    | 125   | 99    | 61    | 160    | 215   | 82    | 91    |
| Cu                             | 30    | 25    | 16    | 52     | 7      | 4      | 28    | 104   | 105   | 28    | 250    | Sp    | 8     | 28    |
| Zn                             | 120   | 78    | 210   | 110    | 99     | 34     | 86    | 9     | 94    | 85    | 110    | 155   | 105   | 105   |
| Ga                             | 23    | 19    | 17    | 19     | 23     | 8      | 23    | 17    | 23    | 18    | 27     | 16    | 16    | 19    |
| Pb                             | 24    | 11    | 46    | 20     | 36     | 10     | 4     | 31    | 7     | 19    | 3      | 11    | 10    | 25    |
| Rb                             | 26    | 29    | 22    | 21     | 295    | 28     | 24    | 29    | 23    | 23    | 23     | 27    | 22    | 25    |
| Si                             | 315   | 275   | Sp    | 205    | 76     | 253    | 280   | 225   | 340   | 260   | 610    | Sp    | 170   | 135   |
| Y                              | 51    | 31    | 18    | 22     | 90     | 20     | 30    | 31    | 23    | 22    | 19     | 22    | 24    | 22    |
| Zr                             | 205   | 225   | 18    | 59     | 450    | 82     | 145   | 210   | 85    | 70    | 220    | 22    | 45    | 37    |



Profil E

| Nr                             | 22    | 23     | 24     | 25     | 26    | 27     | 28    | 29    | 30    | 31    | 32    | 33     | 34    | 35    |
|--------------------------------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|
| Typ                            | HG    | A2     | HG     | A2     | MP    | A2     | A2    | A2    | A2    | HG    | A2    | A2     | A2    | A2    |
| SiO <sub>2</sub>               | 56.91 | 47.05  | 58.37  | 46.67  | 47.53 | 45.66  | 48.69 | 45.96 | 45.84 | 58.78 | 52.86 | 48.14  | 48.69 | 43.41 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 19.29 | 14.46  | 15.15  | 14.04  | 6.00  | 15.50  | 15.69 | 14.10 | 14.83 | 14.72 | 16.89 | 13.59  | 14.46 | 10.05 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 5.74  | 11.37  | 7.89   | 17.30  | 20.68 | 12.61  | 12.19 | 16.55 | 14.41 | 6.84  | 10.84 | 15.07  | 15.13 | 13.71 |
| MgO                            | 2.81  | 9.60   | 3.00   | 5.86   | 20.62 | 6.59   | 6.43  | 6.70  | 7.84  | 2.90  | 2.38  | 6.90   | 6.00  | 9.88  |
| CaO                            | 12.53 | 14.22  | 12.17  | 9.45   | 1.20  | 15.13  | 13.37 | 9.82  | 10.87 | 13.97 | 13.51 | 13.08  | 10.97 | 18.12 |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.74  | 0.39   | 0.70   | 0.90   | 0.08  | 0.98   | 0.27  | 1.69  | 1.49  | Sp    | Sp    | 0.45   | 0.90  | 0.32  |
| K <sub>2</sub> O               | 0.26  | 0.33   | 0.17   | 0.21   | 0.07  | 0.27   | 0.28  | 0.36  | 0.33  | 0.09  | 0.20  | 0.21   | 0.27  | 0.49  |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.38  | 1.65   | 1.35   | 4.40   | 0.15  | 2.02   | 1.76  | 3.26  | 2.53  | 0.98  | 1.17  | 1.84   | 2.63  | 1.94  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.26  | 0.30   | 0.31   | 0.57   | 0.08  | 0.24   | 0.28  | 0.48  | 0.37  | 0.36  | 0.13  | 0.29   | 0.50  | 0.41  |
| MnO                            | 0.14  | 0.20   | 0.19   | 0.33   | 0.03  | 0.22   | 0.21  | 0.26  | 0.26  | 0.30  | 0.34  | 0.18   | 0.23  | 0.48  |
| G.V.                           | 0.34  | 0.53   | 0.88   | 0.34   | 3.17  | 1.03   | 0.69  | 0.29  | 0.24  | 0.55  | 0.39  | 0.39   | 0.10  | 0.61  |
| SUM                            | 99.42 | 100.10 | 100.18 | 100.07 | 99.61 | 100.15 | 99.86 | 99.47 | 99.01 | 99.49 | 98.71 | 100.14 | 99.88 | 99.42 |
| H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>  | 0.16  | 0.16   | 0.28   | 0.22   | 0.37  | 0.20   | 0.91  | 0.39  | 0.21  | 0.39  | 0.36  | 0.24   | 0.21  | 0.24  |
| V                              | 21    | 42     | 105    | 660    | Sp    | 195    | 235   | 420   | 265   | 165   | 115   | 270    | 380   | 5     |
| Cr                             | 115   | 480    | 155    | 325    | 1750  | 460    | 165   | 275   | 275   | 84    | 215   | 185    | 155   | 395   |
| Ni                             | 71    | 160    | 71     | 92     | 650   | 215    | 91    | 74    | 78    | 56    | 70    | 80     | 66    | 140   |
| Cu                             | 15    | 25     | 18     | 24     | Sp    | 30     | 41    | 92    | 13    | 12    | 66    | 67     | 31    | Sp    |
| Zn                             | 56    | 86     | 71     | 242    | 460   | 105    | 106   | 155   | 150   | 105   | 130   | 130    | 170   | 340   |
| Ga                             | 20    | 16     | 21     | 31     | 18    | 19     | 16    | 24    | 24    | 17    | 27    | 21     | 31    | 23    |
| Pb                             | 43    | Sp     | 18     | 1      | 65    | 3      | 13    | 10    | 13    | 17    | 29    | 21     | 22    | 52    |
| Rb                             | 43    | 24     | 32     | 20     | 20    | 23     | 22    | 21    | 26    | 30    | 26    | 22     | 22    | 28    |
| Sr                             | 1340  | 250    | 480    | 60     | Sp    | 385    | 325   | 240   | 245   | 410   | 625   | 320    | 510   | 1340  |
| Y                              | 25    | 21     | 31     | 21     | 69    | 22     | 23    | 23    | 22    | 39    | 23    | 22     | 21    | 24    |
| Zr                             | 350   | 73     | 250    | 82     | Sp    | 78     | 82    | 97    | 94    | 185   | 205   | 81     | 140   | 290   |



Profile

| №                              | 36    | 37    | 38    | 39    | 40     | 41     | 42     | 43    | 44    | 45    | 46     | 47     | 48     | 49     |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| Typ                            | A2    | A2w   | A2    | A2    | BG     | MGh    | MGh    | MGh   | MG    | MG    | MGh    | MGh    | MG     | MG     |
| SiO <sub>2</sub>               | 52.83 | 42.62 | 43.32 | 48.51 | 63.39  | 48.05  | 46.48  | 49.59 | 61.07 | 61.37 | 51.75  | 51.74  | 67.36  | 59.55  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 16.31 | 17.43 | 14.03 | 14.62 | 17.15  | 6.44   | 4.99   | 6.64  | 13.47 | 12.80 | 6.29   | 7.11   | 18.95  | 13.03  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 11.27 | 14.51 | 12.01 | 14.33 | 5.51   | 13.57  | 14.53  | 15.59 | 5.52  | 6.20  | 13.78  | 10.54  | 0.48   | 5.51   |
| MgO                            | 4.59  | 7.91  | 6.23  | 6.82  | 2.04   | 8.57   | 9.76   | 6.70  | 2.95  | 2.97  | 7.41   | 7.52   | Sp     | 7.52   |
| CaO                            | 9.57  | 10.24 | 19.57 | 10.41 | 4.84   | 19.73  | 21.48  | 17.33 | 6.29  | 6.93  | 16.19  | 17.23  | 0.37   | 8.80   |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.82  | 0.98  | Sp    | 1.68  | 3.59   | 0.63   | 0.25   | 0.26  | 4.94  | 4.56  | 1.61   | 2.11   | 7.94   | 5.03   |
| K <sub>2</sub> O               | 1.12  | 0.20  | 0.28  | 0.24  | 2.01   | 0.20   | 0.11   | 0.15  | 4.05  | 3.88  | 1.16   | 1.85   | 5.95   | 3.90   |
| TiO <sub>2</sub>               | 1.78  | 1.65  | 2.77  | 2.57  | 0.92   | 0.38   | 0.59   | 0.45  | 0.30  | 0.20  | 0.51   | 0.29   | 0.05   | 0.17   |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.49  | 0.22  | 0.32  | 0.44  | 0.24   | 1.83   | 1.29   | 1.30  | 0.69  | 0.46  | 1.46   | 1.33   | Sp     | 1.33   |
| MnO                            | 0.16  | 0.22  | 0.27  | 0.20  | 0.09   | 0.50   | 0.47   | 0.60  | 0.15  | 0.17  | 0.36   | 0.30   | 0.01   | 0.15   |
| G.V.                           | 0.47  | 3.40  | 0.33  | 0.11  | 0.39   | 0.38   | 0.34   | 0.79  | 0.26  | 0.12  | 0.27   | 0.42   | 0.10   | 0.26   |
| SUM                            | 99.41 | 99.38 | 99.13 | 99.93 | 100.17 | 100.38 | 100.69 | 99.39 | 99.69 | 99.66 | 100.82 | 100.44 | 101.21 | 100.25 |
| H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>  | 0.20  | 0.65  | 0.27  | 0.28  | 0.27   | 0.23   | 0.26   | 0.32  | 0.41  | 0.21  | 0.39   | 0.26   | 0.14   | 0.20   |
| V                              | 230   | 175   | 288   | 310   | 81     | 43     | 67     | 105   | Sp    | Sp    | 61     | 45     | Sp     | 23     |
| Cr                             | 140   | 290   | 340   | 290   | 147    | 195    | 205    | 145   | 120   | 125   | 140    | 130    | 49     | 90     |
| Ni                             | 83    | 100   | 235   | 120   | 72     | 43     | 60     | 68    | 63    | 51    | 23     | 37     | 28     | 33     |
| Cu                             | 42    | 31    | 16    | 34    | 16     | Sp     | Sp     | Sp    | 7     | Sp    | 3      | Sp     | 9      | 5      |
| Zn                             | 100   | 94    | 110   | 115   | 65     | 160    | 125    | 255   | 81    | 70    | 155    | 79     | Sp     | 40     |
| Ga                             | 26    | 20    | 19    | 25    | 21     | 11     | 8      | 9     | 12    | 14    | 8      | 7      | 18     | 12     |
| Pb                             | 19    | 30    | 6     | 8     | 25     | 35     | 28     | 68    | 57    | 31    | 39     | 24     | 18     | 21     |
| Rb                             | 42    | 21    | 24    | 21    | 70     | 24     | 22     | 22    | 100   | 91    | 34     | 38     | 120    | 79     |
| Sr                             | 380   | 31    | 540   | 155   | 890    | 900    | 640    | 1020  | 1950  | 1080  | 510    | 765    | 970    | 870    |
| Y                              | 26    | 20    | 20    | 23    | 33     | 24     | 19     | 19    | 38    | 34    | 29     | 20     | 42     | 31     |
| Zr                             | 250   | 37    | 130   | 81    | 380    | 180    | 160    | 165   | 480   | 305   | 175    | 160    | 355    | 260    |



Profil E

| Nr                             | 50    | 51     | 52     | 53    | 54     | 55    | 56     | 57     | 58     | 59    | 60     | 61    | 62    | 63    |
|--------------------------------|-------|--------|--------|-------|--------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|
| Typ                            | MG    | MGh    | MG     | MG    | MG     | MG    | MG     | MG     | MG     | MG    | A2     | A2    | A2    | HG    |
| SiO <sub>2</sub>               | 60.52 | 49.91  | 54.82  | 61.48 | 57.56  | 60.91 | 57.58  | 59.28  | 59.92  | 60.69 | 41.89  | 45.85 | 44.41 | 55.95 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 12.22 | 6.65   | 9.59   | 13.77 | 11.56  | 11.60 | 10.79  | 12.17  | 11.71  | 13.83 | 12.24  | 15.50 | 14.53 | 16.31 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 6.78  | 10.74  | 9.57   | 4.82  | 7.66   | 6.16  | 8.85   | 5.61   | 6.04   | 5.27  | 19.31  | 14.39 | 14.40 | 9.06  |
| MgO                            | 2.45  | 6.19   | 3.90   | 2.41  | 3.60   | 3.67  | 4.71   | 3.22   | 3.96   | 1.75  | 7.27   | 6.20  | 8.04  | 5.35  |
| CaO                            | 7.73  | 19.33  | 13.76  | 5.76  | 9.78   | 9.82  | 11.06  | 9.10   | 8.57   | 7.69  | 10.68  | 12.00 | 11.98 | 7.31  |
| Na <sub>2</sub> O              | 3.76  | 1.93   | 3.57   | 5.34  | 2.82   | 2.28  | 2.51   | 4.23   | 3.58   | 3.94  | 1.19   | 0.67  | 1.52  | 1.64  |
| K <sub>2</sub> O               | 3.21  | 1.08   | 2.11   | 4.77  | 2.83   | 3.00  | 3.09   | 4.49   | 4.74   | 4.25  | 0.58   | 0.20  | 0.51  | 1.10  |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.27  | 0.42   | 0.23   | 0.33  | 0.45   | 0.23  | 0.47   | 0.28   | 0.35   | 0.88  | 6.73   | 2.69  | 2.60  | 1.19  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 1.08  | 3.21   | 2.12   | 0.94  | 3.33   | 1.64  | 0.79   | 1.89   | 0.63   | 0.78  | 0.53   | 0.31  | 0.31  | 0.36  |
| MnO                            | 0.15  | 0.27   | 0.21   | 0.14  | 0.22   | 0.24  | 0.19   | 0.13   | 0.17   | 0.16  | 0.26   | 0.28  | 0.22  | 0.15  |
| G.V.                           | 0.50  | 0.56   | 0.53   | 0.18  | 0.21   | 0.72  | 0.34   | 0.22   | 0.41   | 0.53  | 0.37   | 0.36  | 0.46  | 0.30  |
| SUM                            | 98.67 | 100.25 | 100.42 | 99.94 | 100.02 | 99.27 | 100.38 | 100.62 | 100.08 | 99.79 | 101.05 | 98.45 | 98.98 | 98.72 |
| H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>  | 0.12  | 0.22   | 0.13   | 0.21  | 0.22   | 0.11  | 0.21   | 0.12   | 0.22   | 0.10  | 0.34   | 0.17  | 0.28  | 0.23  |
| V                              | Sp    | 29     | 19     | Sp    | 7      | Sp    | 24     | Sp     | Sp     | Sp    | 590    | 280   | 245   | 125   |
| Cr                             | 120   | 155    | 115    | 172   | 80     | 160   | 175    | 175    | 270    | 315   | 730    | 150   | 280   | 130   |
| Ni                             | 21    | 32     | 23     | 44    | 17     | 41    | 72     | 61     | 71     | 57    | 200    | 52    | 76    | 56    |
| Cu                             | 3     | Sp     | Sp     | Sp    | 1      | Sp    | 13     | 8      | 10     | 10    | 190    | 16    | 39    | 14    |
| Zn                             | 57    | 125    | 85     | 65    | 91     | 73    | 92     | 57     | 72     | 84    | 220    | 160   | 110   | 87    |
| Ga                             | 14    | 5      | 9      | 13    | 14     | 10    | 19     | 18     | 15     | 19    | 23     | 20    | 20    | 20    |
| Pb                             | 34    | 29     | 40     | 33    | 46     | 35    | 35     | 51     | 40     | 24    | Sp     | 8     | 2     | 22    |
| Rb                             | 66    | 34     | 46     | 126   | 76     | 69    | 60     | 105    | 105    | 95    | 17     | 18    | 22    | 35    |
| Sr                             | 1180  | 910    | 1000   | 1830  | 1260   | 1330  | 1060   | 2010   | 2050   | 2170  | 140    | 210   | 275   | 670   |
| Y                              | 38    | 30     | 31     | 38    | 48     | 32    | 30     | 36     | 35     | 44    | 20     | 21    | 21    | 29    |
| Zr                             | 280   | 235    | 220    | 490   | 330    | 310   | 270    | 440    | 440    | 450   | 22     | 36    | 57    | 230   |



# Profil E

# Profil F

| Nr                             | 64     | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    |
|--------------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Typ                            | HG     | A2    | A2    | A2    | GG    | A2    | A2    | A2    | A2    | HG    | A2    | HG    |
| SiO <sub>2</sub>               | 47.75  | 47.80 | 49.88 | 46.79 | 45.50 | 48.44 | 50.20 | 49.91 | 51.22 | 47.60 | 50.42 | 64.68 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 17.34  | 16.08 | 15.32 | 17.29 | 22.48 | 17.60 | 15.30 | 15.99 | 16.41 | 18.54 | 16.03 | 14.42 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 13.47  | 12.10 | 14.20 | 11.41 | 10.39 | 15.56 | 11.09 | 10.78 | 10.34 | 10.81 | 8.06  | 5.20  |
| MgO                            | 8.22   | 8.96  | 7.30  | 7.67  | 5.97  | 4.06  | 8.21  | 7.14  | 7.24  | 6.49  | 6.38  | 2.33  |
| CaO                            | 9.19   | 11.75 | 9.78  | 12.43 | 10.30 | 12.72 | 11.95 | 11.97 | 11.77 | 10.27 | 14.83 | 8.53  |
| Na <sub>2</sub> O              | 2.23   | 0.42  | 0.08  | 1.16  | 0.65  | Sp    | Sp    | 0.22  | 0.09  | 0.95  | Sp    | 1.09  |
| K <sub>2</sub> O               | 1.95   | 0.24  | 0.23  | 0.31  | 0.08  | 0.23  | 0.25  | 0.21  | 0.19  | 0.36  | 0.23  | 0.12  |
| TiO <sub>2</sub>               | 1.86   | 1.10  | 2.18  | 1.46  | 3.06  | 3.73  | 1.07  | 2.15  | 1.14  | 1.98  | 2.04  | 0.90  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.41   | 0.21  | 0.30  | 0.27  | 0.17  | 0.48  | 0.23  | 0.32  | 0.29  | 0.38  | 0.42  | 0.25  |
| MnO                            | 0.19   | 0.20  | 0.27  | 0.17  | 0.22  | 0.16  | 0.18  | 0.13  | 0.13  | 0.17  | 0.14  | 0.10  |
| G.V.                           | 0.37   | 0.54  | 0.43  | 0.48  | 0.24  | 0.73  | 0.69  | 0.21  | 0.31  | 1.62  | 0.44  | 1.54  |
| SUM                            | 101.98 | 99.40 | 99.97 | 99.44 | 99.06 | 99.71 | 99.17 | 99.03 | 99.13 | 99.17 | 98.99 | 99.16 |
| H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>  | 0.23   | 0.31  | 0.33  | 0.24  | 0.29  | 0.32  | 0.23  | 0.13  | 0.15  | 1.20  | 0.22  | 0.24  |
| V                              | 120    | 160   | 280   | 200   | 150   | 345   | 38    | 95    | 89    | 190   | 100   | 100   |
| Cr                             | 350    | 120   | 175   | 96    | 450   | 460   | 280   | 380   | 200   | 265   | 260   | 70    |
| Ni                             | 89     | 64    | 91    | 65    | 100   | 160   | 69    | 81    | 95    | 98    | 98    | 56    |
| Cu                             | 10     | 5     | 26    | 38    | 27    | 87    | 9     | 18    | 12    | 17    | 20    | 75    |
| Zn                             | 130    | 126   | 165   | 120   | 105   | 77    | 110   | 78    | 87    | 82    | 78    | 44    |
| Ga                             | 22     | 18    | 17    | 14    | 19    | 22    | 16    | 21    | 20    | 20    | 19    | 20    |
| Pb                             | 7      | 21    | 10    | 17    | Sp    | Sp    | 7     | Sp    | 10    | 4     | Sp    | 12    |
| Rb                             | 43     | 21    | 19    | 23    | 20    | 22    | 22    | 27    | 23    | 20    | 28    | 27    |
| Sr                             | 375    | 120   | 156   | 205   | 395   | 330   | 130   | 253   | 190   | 310   | 225   | 260   |
| Y                              | 30     | 24    | 24    | 23    | 18    | 21    | 24    | 25    | 24    | 25    | 27    | 27    |
| Zr                             | 140    | 28    | 50    | 59    | 91    | 110   | 40    | 110   | 53    | 110   | 120   | 180   |



| Nr                             | 12    | 13    | 14    | 15    | 16    | 17     | 18     | 19    | 20    | 21    | 22    | 23     | 24     | 25    |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|
| Typ                            | A1    | A2    | A2    | A1    | A1    | Q      | A2     | MP    | A2    | MP    | A1    | A1     | P      | BG    |
| SiO <sub>2</sub>               | 47.85 | 51.37 | 51.37 | 48.11 | 47.82 | 92.97  | 47.16  | 42.64 | 47.23 | 43.18 | 49.62 | 49.08  | 71.06  | 55.43 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 14.09 | 15.47 | 20.60 | 14.50 | 17.08 | 2.82   | 14.87  | 6.34  | 17.45 | 5.73  | 14.00 | 15.14  | 19.02  | 17.42 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 7.55  | 10.56 | 8.86  | 11.86 | 10.35 | 1.55   | 8.02   | 22.83 | 11.50 | 22.48 | 11.24 | 12.91  | 2.00   | 8.53  |
| MgO                            | 12.88 | 7.34  | 2.81  | 8.47  | 7.93  | 0.13   | 11.87  | 20.05 | 5.97  | 21.35 | 10.35 | 6.16   | 0.21   | 4.82  |
| CaO                            | 15.32 | 10.92 | 11.48 | 14.40 | 11.90 | 2.30   | 16.72  | 0.55  | 12.06 | 0.89  | 12.77 | 12.91  | 0.48   | 6.73  |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.21  | 0.37  | Sp    | 0.01  | 0.97  | Sp     | Sp     | 1.07  | 0.21  | 0.52  | Sp    | Sp     | 2.47   | 1.15  |
| K <sub>2</sub> O               | 0.15  | 0.74  | 0.25  | 0.31  | 0.20  | Sp     | 0.12   | 0.06  | 0.22  | 0.05  | 0.22  | 0.26   | 4.07   | 1.44  |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.35  | 1.74  | 1.61  | 1.00  | 1.74  | 0.18   | 0.51   | 0.77  | 2.68  | 0.89  | 0.84  | 2.56   | Sp     | 1.18  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.24  | 0.70  | 0.26  | 0.25  | 0.38  | 0.26   | 0.21   | 0.06  | 0.38  | 0.08  | 0.23  | 0.45   | 0.09   | 0.42  |
| MnO                            | 0.11  | 0.14  | 0.14  | 0.14  | 0.17  | 0.03   | 0.10   | 0.11  | 0.42  | 0.10  | 0.13  | 0.21   | 0.07   | 0.15  |
| G.V.                           | 0.40  | 0.40  | 1.18  | 0.79  | 0.46  | 0.58   | 0.55   | 4.95  | 0.16  | 4.01  | 0.54  | 0.50   | 1.45   | 1.43  |
| SUM                            | 99.15 | 99.75 | 98.56 | 99.84 | 99.00 | 100.82 | 100.13 | 99.43 | 98.28 | 99.04 | 99.94 | 100.18 | 100.92 | 98.70 |
| H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>  | 0.48  | 0.48  | 0.44  | 0.34  | 0.22  | 0.21   | 0.28   | 0.62  | 0.28  | 0.60  | 0.26  | 0.26   | 0.22   | 0.31  |
| V                              | 215   | 135   | 225   | 45    | 215   | 13     | 155    | 2490  | 260   | 1900  | 270   | 330    | 20     | 95    |
| Cr                             | 90    | 305   | 115   | 300   | 160   | 27     | 25     | Sp    | 200   | Sp    | 66    | 335    | Sp     | 190   |
| Ni                             | 120   | 165   | 43    | 105   | 90    | 21     | 100    | 690   | 60    | 850   | 91    | 195    | 8      | 71    |
| Cu                             | 7     | 71    | 7     | 9     | 14    | 13     | 15     | 110   | 23    | 77    | 51    | 36     | 29     | 17    |
| Zn                             | 31    | 82    | 63    | 62    | 96    | Sp     | 19     | 270   | 245   | 235   | 52    | 115    | 275    | 160   |
| Ga                             | 14    | 20    | 21    | 14    | 18    | 10     | 15     | 18    | 22    | 12    | 14    | 19     | 19     | 21    |
| Pb                             | 34    | Sp    | 11    | 8     | 10    | 13     | 34     | 800   | 3     | 1690  | 33    | 1      | 28     | 14    |
| Rb                             | 9     | 20    | 25    | 11    | 11    | 32     | 22     | 20    | 19    | 20    | 11    | 10     | 950    | 320   |
| Sr                             | 155   | 230   | 420   | 120   | 450   | 190    | 115    | Sp    | 325   | Sp    | 92    | 550    | 105    | 530   |
| Y                              | 12    | 30    | 27    | 12    | 23    | 43     | 22     | 15    | 23    | 19    | 13    | 25     | 97     | 48    |
| Zr                             | 70    | 190   | 155   | 76    | 155   | 240    | 41     | Sp    | 125   | Sp    | 75    | 180    | 160    | 195   |



| Nr                             | 26     | 27     | 28     | 29    | 30    | 31     | 32    | 33     | 34    | 35    | 36    | 37    | 38     | 39     |
|--------------------------------|--------|--------|--------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| Typ                            | A1     | A1     | A1     | A1    | A2    | A1     | A1    | A1     | HE    | A2    | A1    | A2    | A1     | A1     |
| SiO <sub>2</sub>               | 50.88  | 48.58  | 48.34  | 49.58 | 45.49 | 48.18  | 53.03 | 49.39  | 59.28 | 54.45 | 46.84 | 45.29 | 50.95  | 46.88  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 15.19  | 13.28  | 14.66  | 15.16 | 16.33 | 15.33  | 14.06 | 12.78  | 15.23 | 14.89 | 17.74 | 14.09 | 15.35  | 14.94  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 14.16  | 13.61  | 12.90  | 10.52 | 15.93 | 13.10  | 11.63 | 13.61  | 6.11  | 10.38 | 12.17 | 17.48 | 14.88  | 14.00  |
| MgO                            | 6.22   | 8.58   | 9.71   | 8.92  | 4.30  | 7.72   | 5.56  | 9.40   | 1.45  | 5.19  | 5.22  | 7.43  | 5.47   | 8.10   |
| CaO                            | 9.34   | 12.19  | 11.61  | 11.94 | 11.70 | 12.40  | 11.66 | 12.64  | 16.01 | 10.53 | 12.13 | 9.72  | 9.93   | 12.06  |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.03   | Sp     | 0.69   | Sp    | 0.52  | 0.52   | Sp    | Sp     | Sp    | 0.29  | 0.35  | 0.81  | 0.64   | Sp     |
| K <sub>2</sub> O               | 0.18   | 0.22   | 0.20   | 0.23  | 0.21  | 0.23   | 0.26  | 0.20   | 0.06  | 0.10  | 0.23  | 0.23  | 0.27   | 0.22   |
| TiO <sub>2</sub>               | 3.57   | 2.70   | 1.17   | 2.04  | 3.10  | 1.72   | 2.37  | 2.47   | 0.99  | 1.60  | 3.67  | 3.59  | 2.02   | 3.71   |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.59   | 0.41   | 0.23   | 0.31  | 0.34  | 0.36   | 0.36  | 0.41   | 0.26  | 0.35  | 0.77  | 0.51  | 0.46   | 0.52   |
| MnO                            | 0.25   | 0.21   | 0.15   | 0.24  | 0.21  | 0.18   | 0.17  | 0.18   | 0.10  | 0.23  | 0.36  | 0.25  | 0.27   | 0.22   |
| G.V.                           | 0.13   | 0.81   | 0.56   | 0.41  | 0.49  | 0.37   | 0.41  | 0.12   | 0.49  | 0.71  | 0.04  | 0.48  | 0.23   | 0.18   |
| SUM                            | 100.54 | 100.59 | 100.22 | 99.35 | 98.62 | 100.11 | 99.51 | 101.20 | 99.98 | 98.72 | 99.62 | 99.88 | 100.47 | 100.83 |
| H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>  | 0.50   | 0.32   | 0.19   | 0.16  | 0.48  | 0.27   | 0.23  | 0.17   | 0.21  | 0.32  | 0.27  | 0.30  | 0.26   | 0.17   |
| V                              | 375    | 64     | 155    | 480   | 430   | 280    | 195   | 100    | 97    | 215   | 370   | 490   | 245    | 165    |
| Cr                             | 385    | 870    | 165    | 46    | 260   | 135    | 420   | 630    | 125   | 115   | 320   | 315   | 260    | 841    |
| Ni                             | 98     | 210    | 91     | 69    | 95    | 91     | 120   | 125    | 38    | 60    | 110   | 110   | 60     | 131    |
| Cu                             | 28     | 15     | 20     | 8     | 35    | 17     | 130   | 33     | 14    | 11    | 38    | 61    | 20     | 30     |
| Zn                             | 140    | 115    | 79     | 120   | 140   | 105    | 75    | 120    | 6     | 115   | 170   | 175   | 170    | 108    |
| Ga                             | 21     | 19     | 15     | 17    | 18    | 17     | 16    | 20     | 20    | 21    | 21    | 22    | 19     | 19     |
| Pb                             | Sp     | Sp     | 19     | 25    | 2     | 15     | Sp    | Sp     | 15    | 10    | Sp    | Sp    | 5      | Sp     |
| Rb                             | 8      | 8      | 10     | 7     | 18    | 11     | 7     | 8      | 25    | 22    | 5     | 17    | 10     | 6      |
| Sr                             | 240    | 190    | 125    | 150   | 115   | 245    | 400   | 180    | 730   | 250   | 360   | 57    | 105    | 380    |
| Y                              | 39     | 23     | 11     | 25    | 19    | 18     | 27    | 20     | 29    | 27    | 35    | 21    | 37     | 31     |
| Zr                             | 275    | 165    | 82     | 100   | 32    | 105    | 170   | 145    | 170   | 135   | 260   | 28    | 130    | 245    |



| Nr                             | 40     | 41    | 42     | 43    | 44    | 45    | 46    | 47    | 48    | 49    | 50     | 51    | 52     | 53    |
|--------------------------------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|
| Type                           | A1     | A1    | HE     | A1    | A1    | HG    | BG    | MP    | A1    | MP    | A1     | MP    | A1     | A1    |
| SiO <sub>2</sub>               | 49.04  | 52.90 | 66.00  | 48.13 | 41.33 | 44.50 | 72.86 | 48.05 | 47.82 | 48.82 | 50.34  | 48.36 | 48.94  | 50.06 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 12.80  | 14.33 | 13.99  | 14.87 | 16.99 | 15.53 | 14.51 | 7.18  | 16.57 | 6.33  | 13.46  | 6.22  | 16.10  | 16.41 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 14.39  | 12.07 | 4.36   | 12.38 | 10.05 | 12.88 | 1.94  | 10.68 | 11.87 | 15.71 | 15.25  | 11.78 | 13.65  | 12.91 |
| MgO                            | 8.29   | 4.97  | 0.94   | 8.89  | 6.02  | 3.46  | 0.65  | 20.42 | 8.49  | 17.39 | 10.30  | 21.17 | 8.10   | 5.86  |
| CaO                            | 12.86  | 11.95 | 13.92  | 12.78 | 20.67 | 18.92 | 3.50  | 8.44  | 10.88 | 7.95  | 7.99   | 7.54  | 9.76   | 10.18 |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.19   | Sp    | Sp     | 0.62  | 0.29  | 0.29  | 2.79  | 0.69  | 0.82  | 1.21  | Sp     | 1.07  | 0.20   | 0.63  |
| K <sub>2</sub> O               | 0.27   | 0.39  | 0.01   | 0.23  | 0.14  | 0.15  | 1.84  | 0.15  | 0.20  | 0.16  | 0.43   | 0.22  | 0.24   | 0.26  |
| TiO <sub>2</sub>               | 1.95   | 1.75  | 0.23   | 1.18  | 1.47  | 2.52  | 0.34  | 0.68  | 1.60  | 0.47  | 2.35   | 0.56  | 2.47   | 2.10  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.35   | 0.29  | 0.36   | 0.22  | 0.29  | 0.30  | 0.09  | 0.13  | 0.28  | 0.07  | 0.51   | 0.13  | 0.52   | 0.44  |
| MnO                            | 0.18   | 0.13  | 0.06   | 0.14  | 0.20  | 0.15  | 0.01  | 0.15  | 0.22  | 0.15  | 0.23   | 0.15  | 0.17   | 0.21  |
| G.V.                           | 0.58   | 1.14  | 0.76   | 0.55  | 1.83  | 1.00  | 0.52  | 2.26  | 0.73  | 0.83  | 0.44   | 1.99  | 0.10   | 0.75  |
| SUM                            | 100.90 | 99.82 | 100.63 | 99.99 | 99.28 | 99.70 | 99.05 | 98.83 | 99.48 | 99.09 | 100.94 | 99.19 | 100.25 | 99.81 |
| H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>  | 0.21   | 0.25  | 0.09   | 0.10  | 0.44  | 0.34  | 0.07  | 0.09  | 0.07  | 0.15  | 0.10   | 0.16  | 0.09   | 0.35  |
| V                              | 46     | 310   | Sp     | 160   | 80    | 105   | 55    | Sp    | 105   | Sp    | 200    | Sp    | 245    | 400   |
| Cr                             | 700    | 110   | 160    | 170   | 330   | 630   | Sp    | 2860  | 350   | 2580  | 520    | 2150  | 365    | 150   |
| Ni                             | 155    | 84    | 32     | 100   | 78    | 110   | 14    | 800   | 77    | 140   | 180    | 890   | 135    | 85    |
| Cu                             | 33     | 320   | 12     | 22    | 14    | 22    | 17    | 6     | 16    | 4     | 16     | 9     | 29     | 31    |
| Zn                             | 86     | 82    | Sp     | 67    | 95    | 45    | 4     | 120   | 130   | 195   | 150    | 145   | 115    | 105   |
| Ga                             | 16     | 17    | 18     | 15    | 16    | 16    | 18    | 14    | 19    | 16    | 19     | 15    | 19     | 16    |
| Pb                             | Sp     | 9     | 15     | 14    | 7     | Sp    | 40    | Sp    | 4     | Sp    | Sp     | Sp    | 2      | 9     |
| Rb                             | 8      | 16    | 26     | 10    | 7     | 6     | 54    | 22    | 11    | 18    | 19     | 21    | 13     | 12    |
| Sr                             | 335    | 210   | 660    | 155   | 640   | 720   | 780   | Sp    | 370   | Sp    | 330    | Sp    | 700    | 370   |
| Y                              | 15     | 28    | 29     | 12    | 35    | 87    | 33    | 29    | 18    | 23    | 25     | 57    | 32     | 27    |
| Zr                             | 175    | 120   | 180    | 86    | 160   | 160   | 295   | 58    | 130   | Sp    | 140    | 39    | 230    | 215   |



| Nr                             | 54     | 55    | 56    | 57     | 58    | 59    | 60    | 61     | 62    | 63     | 64    | 65    | 66    | 67     |
|--------------------------------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|
| Typ                            | A1     | MP    | MP    | HG     | A2    | A2    | MP    | HG     | A1    | A1     | A1    | A2    | MP    | BC     |
| SiO <sub>2</sub>               | 46.84  | 45.04 | 46.68 | 63.48  | 48.04 | 46.48 | 46.00 | 65.27  | 49.22 | 46.72  | 48.32 | 51.64 | 45.54 | 67.16  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 16.42  | 9.10  | 8.00  | 13.74  | 14.99 | 16.11 | 10.10 | 15.77  | 15.06 | 14.76  | 15.81 | 15.98 | 9.80  | 16.18  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 16.04  | 11.74 | 10.06 | 6.02   | 12.59 | 12.51 | 12.08 | 5.61   | 15.60 | 16.22  | 14.77 | 9.50  | 10.48 | 3.52   |
| MgO                            | 6.09   | 20.59 | 21.40 | 1.88   | 10.65 | 10.76 | 17.38 | 1.77   | 6.18  | 6.99   | 6.36  | 4.93  | 20.46 | 0.98   |
| CaO                            | 10.24  | 8.09  | 8.07  | 12.41  | 9.30  | 10.14 | 8.35  | 9.14   | 8.49  | 10.72  | 10.28 | 12.39 | 8.52  | 1.81   |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.17   | 0.64  | 0.90  | 0.23   | Sp    | 0.19  | 0.70  | 0.37   | Sp    | 0.55   | Sp    | 1.00  | 1.08  | 2.74   |
| K <sub>2</sub> O               | 0.27   | 0.14  | 0.13  | 0.11   | 0.64  | 0.06  | 0.20  | 0.04   | 0.12  | 0.38   | 0.25  | 0.30  | 0.17  | 6.88   |
| TiO <sub>2</sub>               | 3.48   | 0.80  | 0.74  | 1.38   | 1.45  | 1.57  | 0.92  | 1.07   | 2.93  | 3.47   | 2.84  | 1.73  | 0.63  | 0.76   |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.40   | 0.11  | 0.14  | 0.29   | 0.27  | 0.27  | 0.12  | 0.31   | 0.65  | 0.37   | 0.52  | 0.26  | 0.10  | 0.26   |
| MnO                            | 0.26   | 0.17  | 0.15  | 0.21   | 0.16  | 0.18  | 0.16  | 0.11   | 0.18  | 0.23   | 0.21  | 0.15  | 0.16  | 0.04   |
| G.V.                           | 0.08   | 3.49  | 2.79  | 0.50   | 1.13  | 0.94  | 3.09  | 0.67   | 0.60  | 0.06   | 0.37  | 0.26  | 2.66  | 0.34   |
| SUM                            | 100.29 | 99.91 | 99.06 | 100.25 | 99.22 | 99.21 | 99.08 | 100.13 | 99.03 | 100.47 | 99.73 | 98.14 | 99.60 | 100.67 |
| H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>  | 0.21   | 0.50  | 0.45  | 0.36   | 0.24  | 0.34  | 0.30  | 0.25   | 0.21  | 0.26   | 0.49  | 0.18  | 0.27  | 0.32   |
| V                              | 395    | Sp    | Sp    | Sp     | 110   | 79    | Sp    | 145    | 380   | 335    | 335   | 170   | Sp    | 89     |
| Cr                             | 245    | 2480  | 2170  | 265    | 285   | 360   | 2170  | 69     | 195   | 460    | 235   | 180   | 2850  | 11     |
| Ni                             | 56     | 740   | 860   | 37     | 84    | 135   | 470   | 65     | 52    | 93     | 69    | 57    | 692   | 4      |
| Cu                             | 27     | 7     | 27    | 11     | 13    | 8     | 29    | 51     | 38    | 61     | 12    | 33    | 8     | 17     |
| Zn                             | 160    | 120   | 89    | 69     | 110   | 120   | 107   | 40     | 130   | 115    | 125   | 62    | 63    | 10     |
| Ga                             | 18     | 12    | 13    | 16     | 19    | 20    | 18    | 20     | 19    | 17     | 18    | 19    | 14    | 17     |
| Pb                             | 1      | Sp    | Sp    | Sp     | 4     | 2     | Sp    | 8      | 3     | Sp     | 3     | 8     | Sp    | 42     |
| Rb                             | 10     | 21    | 21    | 24     | 22    | 19    | 24    | 24     | 8     | 12     | 10    | 22    | 22    | 130    |
| Sr                             | 560    | Sp    | Sp    | 255    | 195   | 98    | Sp    | 120    | 290   | 490    | 335   | 660   | Sp    | 1070   |
| Y                              | 33     | 40    | 26    | 35     | 23    | 22    | 27    | 34     | 46    | 42     | 37    | 26    | 24    | 37     |
| Zr                             | 245    | 50    | 57    | 215    | 73    | 31    | 39    | 175    | 285   | 240    | 240   | 185   | 45    | 580    |



| Nr                             | 68    | 69     | 70     | 71     | 72    | 73     | 74    | 75    | 76     | 77    | 78     | 79     | 80    | 81     |
|--------------------------------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|
| Typ                            | A1    | BG     | A1     | A1     | A1    | A1     | A1    | MP    | MP     | A1    | HE     | A1     | MP    | A1     |
| SiO <sub>2</sub>               | 48.76 | 47.75  | 48.37  | 47.59  | 47.24 | 48.12  | 48.45 | 44.54 | 44.09  | 49.79 | 70.22  | 46.42  | 45.78 | 46.31  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 14.69 | 20.51  | 14.66  | 14.77  | 13.55 | 15.28  | 17.63 | 7.05  | 10.00  | 14.54 | 9.63   | 14.04  | 8.84  | 14.74  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 12.55 | 13.77  | 14.47  | 12.85  | 14.29 | 14.98  | 10.97 | 13.75 | 14.04  | 13.68 | 5.71   | 14.42  | 13.50 | 13.76  |
| MgO                            | 8.68  | 3.96   | 7.98   | 9.19   | 8.84  | 7.37   | 3.52  | 20.42 | 18.82  | 6.34  | 1.47   | 9.70   | 20.10 | 9.30   |
| CaO                            | 12.02 | 0.43   | 12.30  | 12.41  | 12.15 | 10.86  | 15.18 | 8.31  | 7.50   | 11.73 | 10.50  | 13.13  | 4.58  | 13.20  |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.26  | 2.02   | Sp     | 0.43   | Sp    | Sp     | Sp    | 0.35  | 0.49   | Sp    | Sp     | Sp     | 0.78  | Sp     |
| K <sub>2</sub> O               | 0.28  | 6.43   | 0.34   | 0.45   | 0.24  | 0.26   | 0.21  | 0.16  | 0.28   | 0.31  | 0.01   | 0.19   | 0.08  | 0.20   |
| TiO <sub>2</sub>               | 1.19  | 1.92   | 1.59   | 1.23   | 2.54  | 2.36   | 2.01  | 0.61  | 0.80   | 2.28  | 0.76   | 1.30   | 0.38  | 1.20   |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.21  | 0.14   | 0.33   | 0.21   | 0.35  | 0.34   | 0.25  | 0.12  | 0.15   | 0.30  | 0.45   | 0.25   | 0.07  | 0.23   |
| MnO                            | 0.16  | 0.07   | 0.17   | 0.15   | 0.25  | 0.18   | 0.13  | 0.16  | 0.16   | 0.18  | 0.16   | 0.18   | 0.13  | 0.16   |
| G.V.                           | 0.66  | 3.80   | 0.47   | 0.82   | 0.69  | 0.43   | 1.09  | 4.39  | 3.73   | 0.77  | 1.38   | 0.89   | 4.77  | 0.96   |
| SUM                            | 99.46 | 100.80 | 100.68 | 100.10 | 99.94 | 100.21 | 99.44 | 99.86 | 100.06 | 99.92 | 100.29 | 100.53 | 99.01 | 100.06 |
| H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>  | 0.24  | 0.61   | 0.21   | 0.27   | 0.11  | 1.10   | 0.37  | 0.33  | 0.42   | 0.16  | 0.26   | 0.18   | 0.48  | 0.15   |
| V                              | 210   | 200    | 275    | 180    | 165   | 395    | 340   | Sp    | Sp     | 340   | 88     | 200    | 125   | 155    |
| Cr                             | 150   | 165    | 147    | 160    | 450   | 235    | 125   | 1850  | 1180   | 160   | 120    | 225    | 640   | 235    |
| Ni                             | 110   | 67     | 98     | 105    | 185   | 115    | 92    | 360   | 580    | 95    | 47     | 93     | 620   | 115    |
| Cu                             | 44    | 33     | 112    | 95     | 83    | 51     | 26    | 15    | 38     | 81    | 14     | 68     | 20    | 18     |
| Zn                             | 73    | 92     | 86     | 73     | 140   | 105    | 51    | 110   | 110    | 89    | 39     | 87     | 185   | 83     |
| Ga                             | 14    | 23     | 17     | 14     | 19    | 19     | 13    | 10    | 16     | 17    | 15     | 11     | 13    | 14     |
| Pb                             | 19    | 17     | 19     | 17     | Sp    | 8      | 11    | Sp    | 3      | 7     | 16     | 14     | 22    | 13     |
| Rb                             | 11    | 110    | 8      | 11     | 8     | 14     | 10    | 20    | 23     | 11    | 24     | 8      | 20    | 8      |
| Str                            | 170   | 15     | 120    | 120    | 255   | 430    | 505   | Sp    | Sp     | 330   | 510    | 210    | Sp    | 160    |
| Y                              | 14    | 35     | 16     | 10     | 24    | 23     | 33    | 22    | 26     | 25    | 30     | 11     | 22    | 7      |
| Zr                             | 94    | 129    | 94     | 84     | 160   | 160    | 146   | 35    | 23     | 150   | 180    | 82     | 21    | 75     |



# Profil F

| Nr                             | 82     | 83    | 84    | 85    | 86    | 87    | 88    | 89     | 90    | 91     | 92    | 93     | 94     | 95    |
|--------------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|--------|-------|
| Typ                            | A1     | A1    | MP    | A1    | HE    | Q     | MP    | MP     | MP    | A2     | HGw   | A2w    | Q      | A1    |
| SiO <sub>2</sub>               | 47.56  | 44.88 | 45.27 | 49.86 | 46.64 | 81.88 | 48.25 | 45.01  | 48.45 | 44.49  | 41.36 | 42.44  | 96.04  | 47.59 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 14.04  | 18.77 | 8.56  | 16.01 | 13.73 | 3.33  | 7.70  | 7.80   | 4.99  | 14.58  | 24.84 | 13.32  | 0.43   | 16.62 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 14.33  | 13.71 | 15.61 | 13.57 | 10.74 | 4.62  | 16.30 | 23.54  | 11.64 | 16.41  | 12.03 | 19.48  | 2.19   | 13.30 |
| MgO                            | 9.74   | 5.84  | 19.88 | 3.58  | 3.70  | 0.63  | 16.61 | 15.50  | 19.81 | 5.21   | 5.07  | 6.68   | Sp     | 6.16  |
| CaO                            | 12.65  | 12.78 | 5.77  | 10.36 | 19.52 | 1.44  | 4.78  | 1.62   | 9.72  | 10.51  | 11.15 | 10.12  | Sp     | 11.20 |
| Na <sub>2</sub> O              | Sp     | 0.02  | 0.28  | Sp    | Sp    | 1.83  | 0.87  | 0.85   | 0.98  | 0.77   | 0.29  | 0.41   | 0.12   | 1.22  |
| K <sub>2</sub> O               | 0.34   | 0.31  | 0.14  | 0.42  | 0.13  | 4.86  | 0.14  | 0.26   | 0.15  | 0.25   | 0.21  | 0.33   | 0.05   | 0.23  |
| TiO <sub>2</sub>               | 1.11   | 1.62  | 0.73  | 3.84  | 2.72  | 0.58  | 0.46  | 0.47   | 0.44  | 3.41   | 3.12  | 5.18   | 0.64   | 2.04  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.26   | 0.16  | 0.13  | 0.87  | 0.25  | 0.21  | 0.34  | 0.18   | 0.59  | 1.80   | 0.13  | 0.62   | 0.11   | 0.29  |
| MnO                            | 0.17   | 0.31  | 0.16  | 0.25  | 0.25  | 0.04  | 0.09  | 0.05   | 0.14  | 0.20   | 0.16  | 0.23   | 0.02   | 0.18  |
| G.V.                           | 0.38   | 0.75  | 2.92  | 1.21  | 1.47  | 0.47  | 3.77  | 5.00   | 1.23  | 3.04   | 1.42  | 1.66   | 0.51   | 0.29  |
| SUM                            | 100.58 | 99.15 | 99.45 | 99.97 | 99.15 | 99.89 | 99.31 | 100.28 | 98.18 | 100.87 | 99.78 | 100.47 | 100.11 | 99.12 |
| H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>  | 0.14   | 0.32  | 0.37  | 0.63  | 0.39  | 0.17  | 0.58  | 1.32   | 0.21  | 1.05   | 0.23  | 1.04   | 0.14   | 0.20  |
| V                              | 215    | 240   | Sp    | 520   | 450   | 35    | Sp    | 670    | 110   | 500    | 190   | 630    | 46     | 210   |
| Cr                             | 125    | 240   | 2380  | 250   | 100   | 37    | 2700  | 540    | 460   | 290    | 450   | 250    | 32     | 200   |
| Ni                             | 71     | 100   | 660   | 92    | 95    | 15    | 435   | 950    | 680   | 140    | 98    | 105    | 20     | 69    |
| Cu                             | 44     | 16    | 28    | 150   | 77    | 19    | 17    | 135    | 23    | 90     | 32    | 96     | 17     | 14    |
| Zn                             | 100    | 220   | 240   | 120   | 145   | 65    | 325   | 590    | 265   | 155    | 79    | 170    | Sp     | 86    |
| Ga                             | 13     | 20    | 16    | 19    | 20    | 22    | 20    | 21     | 17    | 22     | 21    | 21     | 8      | 18    |
| Pb                             | 25     | 13    | Sp    | Sp    | 2     | 23    | Sp    | 95     | 37    | Sp     | Sp    | Sp     | 11     | 7     |
| Rb                             | 12     | 13    | 20    | 12    | 3     | 145   | 20    | 20     | 21    | 19     | 10    | 17     | 35     | 12    |
| Sr                             | 130    | 400   | Sp    | 530   | 410   | 170   | Sp    | Sp     | Sp    | 305    | 800   | 96     | 62     | 215   |
| Y                              | 12     | 25    | 37    | 63    | 195   | 68    | 33    | 28     | 65    | 31     | 10    | 28     | 37     | 22    |
| Zr                             | 78     | 145   | 10    | 300   | 165   | 450   | 20    | Sp     | 74    | 44     | 185   | 41     | 315    | 140   |



Profil F

| Nr                             | 96    | 97    | 98    | 1     | 2      | 3      | 4     | 5     | 6     | 7      | 8      | 9      |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| Typ                            | HG    | HG    | HG    | BGw   | HG     | A2     | CG    | BGw   | BG    | CGw    | A2     | CG     |
| SiO <sub>2</sub>               | 53.18 | 58.62 | 51.61 | 80.20 | 57.63  | 42.48  | 69.51 | 60.90 | 71.19 | 38.80  | 47.35  | 69.34  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 15.10 | 17.52 | 12.55 | 7.72  | 17.32  | 13.69  | 11.01 | 16.87 | 11.51 | 28.39  | 14.94  | 12.46  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 9.73  | 3.08  | 10.77 | 4.53  | 13.42  | 19.13  | 8.20  | 11.19 | 7.86  | 12.30  | 13.55  | 10.16  |
| MgO                            | 0.90  | 0.86  | 3.51  | 1.14  | 3.27   | 6.35   | 1.67  | 2.03  | 1.99  | 5.21   | 6.42   | 1.40   |
| CaO                            | 16.46 | 4.31  | 11.43 | 0.23  | 0.17   | 10.41  | 0.87  | Sp    | 0.52  | 0.26   | 14.83  | Sp     |
| Na <sub>2</sub> O              | Sp    | 1.93  | 1.37  | 0.38  | 0.50   | 0.64   | 2.24  | 0.56  | 0.55  | 1.89   | Sp     | 0.37   |
| K <sub>2</sub> O               | 0.13  | 10.64 | 5.41  | 1.03  | 3.81   | 0.35   | 1.18  | 3.40  | 2.05  | 6.62   | 0.24   | 2.17   |
| TiO <sub>2</sub>               | 1.42  | 0.99  | 1.34  | 0.93  | 1.46   | 5.88   | 1.66  | 1.29  | 1.25  | 2.37   | 2.42   | 1.60   |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.43  | 0.34  | 0.56  | 0.15  | 0.19   | 0.76   | 0.16  | 0.14  | 0.14  | 0.14   | 0.36   | 0.13   |
| MnO                            | 0.19  | 0.07  | 0.30  | 0.11  | 0.21   | 0.26   | 0.17  | 0.22  | 0.10  | 0.10   | 0.19   | 0.08   |
| G.V.                           | 1.52  | 0.31  | 0.27  | 1.83  | 3.03   | 0.59   | 2.28  | 3.30  | 1.92  | 5.36   | 0.09   | 2.32   |
| SUM                            | 99.06 | 98.67 | 99.12 | 98.85 | 101.01 | 100.54 | 98.95 | 99.90 | 98.98 | 101.44 | 100.39 | 100.03 |
| H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>  | 0.37  | 0.16  | 0.31  | 0.56  | 0.33   | 0.39   | 0.55  | 0.33  | 0.32  | 0.32   | 0.25   | 0.56   |
| V                              | Sp    | Sp    | Sp    | 75    | 215    | 580    | 155   | 230   | 170   | 175    | 380    | 195    |
| Cr                             | 2370  | Sp    | Sp    | 94    | 150    | 470    | 190   | 65    | 30    | 330    | 155    | 185    |
| Ni                             | 200   | Sp    | 4     | 50    | 69     | 105    | 69    | 51    | 40    | 97     | 89     | 75     |
| Cu                             | 11    | Sp    | Sp    | 26    | 28     | 100    | 26    | 15    | 25    | 63     | 58     | 40     |
| Zn                             | 47    | 29    | 220   | 57    | 155    | 230    | 95    | 175   | 70    | 125    | 94     | 46     |
| Ga                             | 18    | 15    | 15    | 16    | 23     | 25     | 18    | 21    | 19    | 26     | 17     | 19     |
| Pb                             | 39    | 614   | 375   | 8     | 18     | Sp     | 6     | 22    | 26    | 2      | 5      | 7      |
| Rb                             | 48    | 164   | 82    | 51    | 74     | 17     | 49    | 78    | 58    | 130    | 19     | 69     |
| Sr                             | 6230  | 3330  | 3160  | 60    | 27     | 57     | 125   | 19    | 75    | 59     | 145    | 6      |
| Y                              | 105   | 52    | 42    | 39    | 31     | 31     | 39    | 37    | 35    | 34     | 20     | 30     |
| Zr                             | 485   | 870   | 690   | 370   | 120    | 60     | 330   | 135   | 230   | 185    | 39     | 254    |



# Profil G

| Nr                             | 10     | 11     | 12    | 13     | 14     | 15     | 16     | 17     | 18    | 19     | 20     | 21     | 22     | 23    |
|--------------------------------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|
| Typ                            | A2     | A2     | A2    | A2     | A2     | A2w    | SGw    | A2     | A2    | A2     | A2     | Mw     | A2     | HGw   |
| SiO <sub>2</sub>               | 45.97  | 45.76  | 49.76 | 47.33  | 47.33  | 45.53  | 79.19  | 46.80  | 47.31 | 46.59  | 45.54  | 59.16  | 51.42  | 62.02 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 14.62  | 15.71  | 13.98 | 13.77  | 13.68  | 12.89  | 10.94  | 18.24  | 15.39 | 15.05  | 16.87  | 12.83  | 14.01  | 18.55 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 12.48  | 15.83  | 11.98 | 14.28  | 13.15  | 22.33  | 4.07   | 14.35  | 11.88 | 13.45  | 12.63  | 18.25  | 13.56  | 5.16  |
| MgO                            | 9.73   | 7.72   | 9.61  | 9.86   | 10.39  | 4.53   | 0.62   | 4.45   | 8.78  | 9.17   | 9.08   | 0.18   | 7.62   | 2.38  |
| CaO                            | 14.03  | 12.05  | 12.32 | 11.93  | 12.21  | 0.14   | 0.01   | 11.69  | 13.31 | 12.29  | 12.11  | Sp     | 10.05  | 3.95  |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.62   | 0.02   | 0.23  | 0.95   | 0.81   | 0.47   | Sp     | 0.31   | 0.30  | 0.74   | 0.17   | Sp     | 0.72   | 2.74  |
| K <sub>2</sub> O               | 0.26   | 0.30   | 0.17  | 0.25   | 0.37   | 5.22   | 3.15   | 0.42   | 0.25  | 0.22   | 0.32   | Sp     | 0.27   | 1.32  |
| TiO <sub>2</sub>               | 1.59   | 2.88   | 1.27  | 1.71   | 1.36   | 4.94   | 0.22   | 2.71   | 1.63  | 1.61   | 1.41   | 3.68   | 1.34   | 0.57  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.40   | 0.43   | 0.30  | 0.35   | 0.29   | 0.24   | 0.04   | 0.47   | 0.27  | 0.28   | 0.27   | 0.07   | 0.24   | 0.24  |
| MnO                            | 0.18   | 0.20   | 0.14  | 0.18   | 0.16   | 0.22   | 0.02   | 0.23   | 0.15  | 0.19   | 0.15   | 0.75   | 0.19   | 0.07  |
| G.V.                           | 0.24   | 0.06   | 0.04  | 0.15   | 0.66   | 4.61   | 2.56   | 0.68   | 0.48  | 0.67   | 1.89   | 5.18   | 0.72   | 2.42  |
| SUM                            | 100.12 | 100.96 | 99.80 | 100.71 | 100.41 | 101.12 | 100.82 | 100.35 | 99.75 | 100.26 | 100.44 | 100.12 | 100.14 | 99.42 |
| H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>  | 0.27   | 0.23   | 0.19  | 0.24   | 0.35   | 0.51   | 0.72   | 0.31   | 0.21  | 0.17   | 0.28   | 0.93   | 0.25   | 1.04  |
| V                              | 135    | 305    | 84    | 115    | 35     | 610    | 31     | 290    | 300   | 135    | 120    | 360    | 250    | 81    |
| Cr                             | 355    | 360    | 285   | 325    | 374    | 790    | 48     | 260    | 59    | 230    | 235    | 910    | 49     | 74    |
| Ni                             | 150    | 130    | 91    | 105    | 88     | 165    | 39     | 61     | 67    | 79     | 77     | 140    | 52     | 34    |
| Cu                             | 130    | 18     | 17    | 38     | 115    | 315    | 40     | 48     | 23    | 52     | 47     | 160    | 39     | 21    |
| Zn                             | 70     | 115    | 72    | 89     | 72     | 420    | 15     | 155    | 64    | 110    | 82     | 510    | 115    | 30    |
| Ga                             | 17     | 18     | 15    | 15     | 13     | 25     | 20     | 22     | 15    | 22     | 20     | 22     | 19     | 20    |
| Pb                             | 3      | Sp     | 6     | 5      | 4      | Sp     | 28     | 3      | 20    | 13     | 14     | Sp     | 43     | 23    |
| Rb                             | 19     | 18     | 19    | 19     | 19     | 240    | 150    | 21     | 19    | 21     | 21     | 17     | 20     | 63    |
| Sr                             | 110    | 170    | 155   | 92     | 85     | Sp     | 34     | 160    | 165   | 59     | 75     | Sp     | 145    | 570   |
| Y                              | 21     | 19     | 22    | 22     | 28     | 32     | 57     | 24     | 21    | 23     | 23     | 24     | 24     | 37    |
| Zr                             | 27     | 37     | 60    | 30     | 37     | Sp     | 325    | 55     | 33    | 8      | 15     | 97     | 26     | 270   |



| Nr                             | 24    | 25    | 26     | 27    | 28    | 29     | 30     | 31     | 32     | 1     |       |       |
|--------------------------------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|
|                                |       |       |        |       |       |        |        |        |        | A2w   | Mw    | Mw    |
| Typ                            | A2    | A2    | A2     | Mw    | MP    | A2     | A2     | TA     | TA     |       |       |       |
| SiO <sub>2</sub>               | 53.17 | 47.67 | 48.50  | 43.46 | 48.56 | 45.52  | 47.80  | 53.94  | 53.78  | 42.55 | 62.73 | 53.65 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 15.38 | 13.21 | 14.22  | 20.58 | 7.27  | 15.97  | 13.79  | 3.18   | 3.76   | 18.18 | 15.04 | 18.91 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 11.20 | 16.69 | 13.62  | 19.58 | 14.53 | 14.85  | 13.85  | 7.90   | 8.88   | 21.45 | 13.36 | 15.88 |
| MgO                            | 4.08  | 7.75  | 9.73   | 3.13  | 18.06 | 7.69   | 9.75   | 30.20  | 29.04  | 0.75  | 0.76  | 0.55  |
| CaO                            | 10.85 | 10.21 | 11.49  | Sp    | 7.49  | 12.49  | 11.89  | 0.26   | 0.12   | Sp.   | Sp.   | Sp    |
| Na <sub>2</sub> O              | Sp    | 0.29  | 0.31   | Sp    | 0.88  | 0.78   | 0.59   | Sp     | Sp     | 0.04  | Sp    | Sp    |
| K <sub>2</sub> O               | 0.19  | 0.26  | 0.21   | 0.85  | 0.13  | 0.38   | 0.23   | 0.02   | 0.02   | 0.02  | 0.02  | Sp    |
| TiO <sub>2</sub>               | 2.21  | 2.04  | 1.59   | 2.08  | 0.28  | 1.98   | 1.58   | 0.24   | 0.24   | 7.59  | 1.70  | 2.92  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.45  | 0.28  | 0.34   | 0.56  | 0.21  | 0.29   | 0.31   | 0.14   | 0.08   | 0.61  | 0.11  | 0.07  |
| MnO                            | 0.24  | 0.26  | 0.19   | 0.09  | 0.14  | 0.22   | 0.16   | 0.09   | 0.07   | 0.25  | 0.15  | 0.15  |
| G.V.                           | 1.86  | 0.62  | 0.29   | 9.66  | 1.47  | 0.42   | 0.41   | 4.29   | 4.24   | 8.35  | 6.11  | 7.84  |
| SUM                            | 99.63 | 99.28 | 100.49 | 99.99 | 99.02 | 100.59 | 100.36 | 100.26 | 100.23 | 99.79 | 99.98 | 99.96 |
| H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>  | 0.98  | 0.21  | 0.10   | 2.53  | 0.18  | 0.05   | 0.12   | 0.22   | 0.25   | 4.23  | 1.11  | 1.51  |
| V                              | 260   | 385   | 77     | 180   | Sp    | 300    | 145    | 115    | 150    | 580   | 215   | 92    |
| Cr                             | 260   | 66    | 360    | 620   | 980   | 165    | 195    | 1230   | 1000   | 3900  | 265   | 1300  |
| Ni                             | 96    | 39    | 110    | 215   | 265   | 70     | 83     | 1630   | 1440   | 790   | 85    | 145   |
| Cu                             | 26    | 470   | 22     | 52    | 6     | 60     | 58     | 35     | 34     | 510   | 46    | 71    |
| Zn                             | 160   | 165   | 115    | 120   | 205   | 130    | 86     | 72     | 74     | 275   | 33    | 52    |
| Ga                             | 23    | 18    | 19     | 23    | 28    | 19     | 18     | 7      | 7      | 31    | 18    | 22    |
| Pb                             | 2     | 28    | 7      | 23    | 5     | 12     | 16     | 23     | 26     | Sp    | 11    | Sp    |
| Rb                             | 21    | 16    | 19     | 30    | 20    | 18     | 18     | 27     | 25     | 15    | 22    | 18    |
| Sr                             | 270   | Sp    | 155    | 29    | 30    | 72     | 150    | Sp     | Sp     | Sp    | Sp    | Sp    |
| Y                              | 30    | 22    | 21     | 36    | 22    | 24     | 21     | 30     | 27     | 22    | 28    | 23    |
| Zr                             | 115   | Sp    | 47     | Sp    | 20    | Sp     | 35     | 108    | 92     | Sp    | 43    | Sp    |



|                                | 4     | 5      | 6     | 7      | 8     | 9     | 10    | 11     | 12    | 13    | 14    | 15    | 16    | 17    |
|--------------------------------|-------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Ne                             |       |        |       |        |       |       |       |        |       |       |       |       |       |       |
| Type                           | A2w   | Mw     | A2w   | MP     | MP    | A2w   | HGw   | BGw    | MP    | MP    | MP    | MP    | Q     | Mw    |
| SiO <sub>2</sub>               | 41.25 | 56.78  | 44.77 | 48.29  | 45.37 | 51.31 | 50.93 | 72.48  | 72.87 | 43.42 | 45.74 | 46.75 | 90.80 | 74.91 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 22.43 | 14.34  | 19.19 | 5.18   | 7.45  | 19.73 | 18.82 | 3.70   | 2.71  | 5.15  | 5.25  | 5.29  | 0.53  | 13.70 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 21.43 | 19.24  | 18.91 | 14.18  | 12.83 | 16.10 | 18.34 | 14.55  | 14.16 | 16.59 | 28.70 | 22.97 | 4.84  | 3.39  |
| MgO                            | 1.31  | 0.18   | 2.45  | 23.97  | 21.03 | 1.25  | 1.51  | 2.34   | 3.17  | 27.30 | 15.49 | 19.23 | 1.17  | 0.65  |
| CaO                            | Sp    | Sp     | 1.60  | 3.31   | 7.74  | Sp    | Sp    | Sp     | Sp    | 3.67  | 0.44  | 2.32  | Sp    | Sp    |
| Na <sub>2</sub> O              | Sp    | Sp     | 0.20  | Sp     | 0.57  | Sp    | Sp    | 0.61   | 0.85  | Sp    | Sp    | 0.15  | Sp    | Sp    |
| K <sub>2</sub> O               | 0.01  | Sp     | 0.01  | 0.03   | 0.19  | Sp    | 0.30  | 0.05   | 0.02  | 0.05  | 0.05  | 0.07  | Sp    | 0.31  |
| TiO <sub>2</sub>               | 2.45  | 1.93   | 2.75  | 0.34   | 0.54  | 2.77  | 1.32  | 3.89   | 3.40  | 0.21  | 0.06  | 0.02  | 1.57  | 0.70  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.12  | 0.16   | 0.24  | 0.05   | 0.11  | 0.10  | 0.03  | 0.14   | 0.22  | 0.11  | 0.03  | 0.05  | 0.13  | 0.03  |
| MnO                            | 0.20  | 0.24   | 0.16  | 0.12   | 0.15  | 0.18  | Sp    | 0.16   | 0.17  | 0.20  | 0.05  | 0.07  | 0.10  | 0.03  |
| G.V.                           | 10.35 | 7.49   | 8.36  | 4.53   | 3.55  | 8.54  | 8.45  | 2.12   | 1.82  | 2.61  | 2.75  | 2.47  | 0.59  | 4.89  |
| SUM                            | 99.55 | 100.36 | 98.64 | 100.00 | 99.53 | 99.98 | 99.70 | 100.04 | 99.39 | 99.31 | 98.56 | 99.39 | 99.73 | 98.61 |
| H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>  | 6.38  | 1.49   | 6.51  | 0.48   | 0.63  | 6.53  | 2.84  | 1.05   | 0.91  | 0.51  | 0.59  | 0.95  | 0.48  | 0.86  |
| V                              | 235   | 360    | 275   | Sp     | Sp    | 660   | 365   | 205    | 165   | Sp    | Sp    | Sp    | 55    | 89    |
| Cr                             | 1270  | 175    | 440   | 1850   | 2950  | 470   | 135   | 850    | 830   | 2480  | 1120  | 1750  | 150   | 50    |
| Ni                             | 260   | 81     | 150   | 530    | 440   | 530   | 140   | 140    | 115   | 800   | 100   | 210   | 45    | 43    |
| Cu                             | 86    | 81     | 67    | 21     | Sp    | 61    | 170   | 190    | 195   | Sp    | 11    | Sp    | 70    | 39    |
| Zn                             | 170   | 115    | 165   | 190    | 110   | 100   | 61    | 98     | 115   | 250   | 530   | 540   | 55    | 26    |
| Ga                             | 22    | 10     | 21    | 15     | 16    | 24    | 21    | 17     | 18    | 11    | 15    | 13    | 14    | 19    |
| Pb                             | 11    | 49     | 11    | Sp     | Sp    | 8     | 79    | Sp     | Sp    | Sp    | Sp    | Sp    | Sp    | 7     |
| Rb                             | 17    | 21     | 18    | 22     | 24    | 21    | 23    | 20     | 19    | 19    | 19    | 17    | 26    | 47    |
| Sr                             | Sp    | Sp     | Sp    | Sp     | Sp    | Sp    | Sp    | Sp     | Sp    | Sp    | Sp    | Sp    | Sp    | Sp    |
| Y                              | 44    | 35     | 44    | 22     | 29    | 23    | 37    | 19     | 20    | 32    | 12    | 17    | 30    | 41    |
| Zr                             | Sp    | 51     | Sp    | 36     | 34    | 52    | 8     | 245    | 340   | 58    | Sp    | Sp    | 170   | 245   |



| NI                             | 18    | 19    | 20    | 21     | 22     | 23     | 24    | 25    | 26    | 27    | 28     | 29    | 30    | 31     |
|--------------------------------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|
| Typ                            | MP    | A2w   | HGw   | A2w    | HGw    | A2     | A2    | MP    | Mw    | A2    | Mw     | A2    | BGw   | TA     |
| SiO <sub>2</sub>               | 49.11 | 53.52 | 46.85 | 45.92  | 57.03  | 45.99  | 48.02 | 47.59 | 61.82 | 49.67 | 56.45  | 47.87 | 61.56 | 52.37  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 5.10  | 14.29 | 5.69  | 13.88  | 13.64  | 14.43  | 14.97 | 7.46  | 9.36  | 14.19 | 11.39  | 15.68 | 18.05 | 2.86   |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 17.65 | 15.03 | 24.13 | 19.16  | 16.59  | 15.98  | 12.22 | 12.43 | 21.43 | 10.43 | 25.37  | 12.29 | 10.50 | 7.55   |
| MgO                            | 15.11 | 4.79  | 18.03 | 6.52   | 3.21   | 8.49   | 9.31  | 16.40 | 2.85  | 6.64  | 1.59   | 0.46  | 0.74  | 31.74  |
| CaO                            | 9.16  | 5.50  | 0.68  | 7.91   | Sp     | 11.48  | 11.74 | 11.53 | 0.42  | 12.67 | 0.13   | 10.71 | Sp    | 0.13   |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.43  | 0.77  | 0.92  | 0.14   | Sp     | 1.16   | 0.40  | 1.06  | 0.07  | 1.07  | Sp     | 0.99  | Sp    | Sp     |
| K <sub>2</sub> O               | 0.20  | 0.11  | 0.05  | 0.21   | 0.15   | 0.31   | 0.22  | 0.23  | 0.04  | 0.60  | 0.01   | 0.21  | 1.25  | 0.02   |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.96  | 2.48  | 0.04  | 3.59   | 1.70   | 2.06   | 1.46  | 0.69  | 0.28  | 1.88  | 0.53   | 1.67  | 0.87  | 0.24   |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.29  | 0.41  | 0.04  | 0.45   | 0.32   | 0.29   | 0.27  | 0.11  | 0.25  | 0.27  | 0.43   | 0.25  | 0.06  | 0.14   |
| MnO                            | 0.31  | 0.21  | Sp    | 0.20   | 0.17   | 0.24   | 0.21  | 0.16  | 0.07  | 0.26  | 0.30   | 0.18  | 0.02  | 0.04   |
| G.V.                           | 1.67  | 2.20  | 2.87  | 2.25   | 7.89   | 0.59   | 0.68  | 1.47  | 1.86  | 0.93  | 4.46   | 1.28  | 6.67  | 5.04   |
| SUM                            | 99.99 | 99.31 | 99.30 | 100.23 | 100.70 | 101.02 | 99.50 | 99.13 | 98.45 | 98.61 | 100.66 | 99.59 | 99.72 | 100.13 |
| H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>  | 1.32  | 1.39  | 1.34  | 1.45   | 2.90   | 0.13   | 0.13  | 0.28  | 0.71  | 0.30  | 1.17   | 0.29  | 1.27  | 0.22   |
| V                              | Sp    | 420   | Sp    | 480    | Sp     | 335    | 65    | Sp    | 230   | 230   | 225    | 115   | 87    | 260    |
| Cr                             | 2750  | 325   | 1800  | 350    | 1200   | 66     | 275   | 550   | 305   | 95    | 570    | 275   | 220   | 760    |
| Ni                             | 57    | 125   | 84    | 155    | 140    | 43     | 80    | 165   | 54    | 60    | 80     | 105   | 52    | 1600   |
| Cu                             | 19    | 99    | Sp    | 58     | 98     | 63     | 35    | 6     | 13    | 15    | 31     | 66    | 31    | 37     |
| Zn                             | 240   | 110   | 520   | 160    | 160    | 122    | 100   | 105   | 550   | 185   | 1800   | 95    | Sp    | 18     |
| Ga                             | 10    | 19    | 12    | 21     | 24     | 17     | 19    | 13    | 3     | 21    | 8      | 20    | 20    | 7      |
| Pb                             | Sp    | 2     | Sp    | Sp     | Sp     | 27     | 9     | Sp    | 165   | 16    | 260    | 8     | 15    | 25     |
| Rb                             | 17    | 18    | 17    | 15     | 25     | 17     | 20    | 22    | 16    | 25    | 16     | 21    | 38    | 28     |
| Sr                             | Sp    | 135   | Sp    | Sp     | Sp     | 13     | 170   | Sp    | Sp    | 430   | Sp     | 165   | Sp    | Sp     |
| Y                              | 17    | 26    | 15    | 41     | 78     | 23     | 24    | 24    | 19    | 24    | 17     | 24    | 33    | 31     |
| Zr                             | Sp    | 72    | Sp    | Sp     | 350    | Sp     | 43    | 4     | Sp    | 115   | Sp     | 53    | 195   | 120    |



# $Fe^{2+}/Fe^{3+}$ - Bestimmungen

|                                |       |       |      |      |       |       |       |       |       |       |      |       |      |       |
|--------------------------------|-------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|------|-------|
| Ni                             | A 32  | A 33  | A 34 | A 36 | A 38  | A 41  | A 50  | A 53  | A 56  | A 62  | B 7  | B 10  | B 13 | B 31  |
| FeO                            | 12.56 | 11.80 | 9.00 | 6.51 | 10.29 | 8.56  | 8.11  | 6.90  | 12.03 | 7.87  | 7.47 | 6.94  | 5.44 | 10.88 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 2.81  | 2.82  | 1.66 | 4.20 | 0.42  | 3.11  | 4.14  | 2.57  | 1.49  | 4.03  | 7.36 | 3.19  | 6.00 | 1.07  |
| Ni                             | B 32  | C 5   | C 42 | C 54 | C 82  | D 4   | D 7   | D 10  | D 11  | D 12  | D 14 | D 18  | E 53 | E 54  |
| FeO                            | 8.46  | 8.34  | 9.38 | 8.12 | 12.43 | 15.56 | 14.28 | 12.10 | 13.00 | 11.48 | 9.30 | 14.47 | 3.03 | 4.50  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1.58  | 0.53  | 4.11 | 6.09 | 4.65  | 2.24  | 2.04  | 2.70  | 3.88  | 5.05  | 3.38 | 1.78  | 1.75 | 1.15  |
| Ni                             | E 60  | E 61  | F 30 | F 36 | F 37  | F 39  | F 40  | F 47  | F 48  | F 54  | F 56 | F 63  | F 71 |       |
| FeO                            | 15.09 | 9.71  | 8.26 | 9.04 | 11.78 | 10.49 | 8.55  | 8.18  | 8.45  | 14.13 | 7.93 | 10.92 | 8.55 |       |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 2.54  | 3.60  | 6.75 | 2.12 | 4.39  | 2.34  | 4.89  | 1.59  | 2.48  | 0.34  | 2.93 | 4.08  | 3.35 |       |

## Au - Bestimmungen (in ppm)

|    |      |      |      |      |      |      |
|----|------|------|------|------|------|------|
| Ni | A 34 | A 37 | B 19 | B 24 | E 19 | F 56 |
|    | 0.03 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.05 | 0.04 |



### Lebensdaten

Name: Bernhard Maria Wagner

Geburtstag: 13. 4. 1950

Geburtsort: Kempten/Allg.

Eltern: Willy Wagner, Finanzbeamter, gestorben 1972  
Louise Wagner, geb. Eger

Schulen: 1956 - 1960 Volksschule Kempten  
1960 - 1969 Allgäu - Gymnasium Kempten

Wehrdienst: 1969 - 1970

Studium: im WS 1970/71 Einschreibung für das Fach Geologie an  
der Ludwig Maximilians Universität in München  
1973: Diplomgeologen-Vorprüfung  
1976: Diplomgeologen-Hauptprüfung  
Januar 1977: Beginn mit der Dissertation an der Universität München

Beruf: seit Dezember 1978 wissenschaftlicher Mitarbeiter am  
geologischen Institut der Universität München

Heirat: verheiratet seit 1975 mit Elisabeth, geb. Billo





